

# Matière Noire et dynamique des galaxies

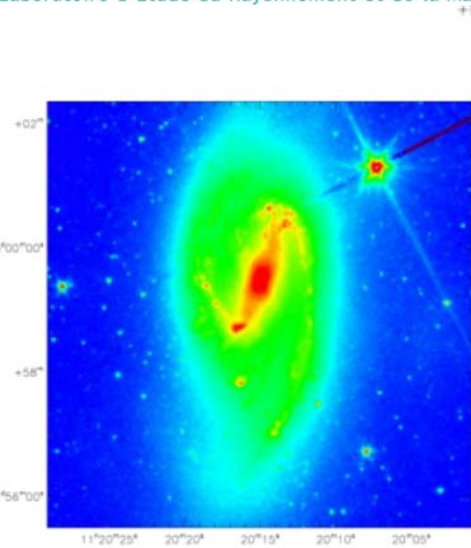
Françoise Combes  
*Lundi 15 Juin 2009*



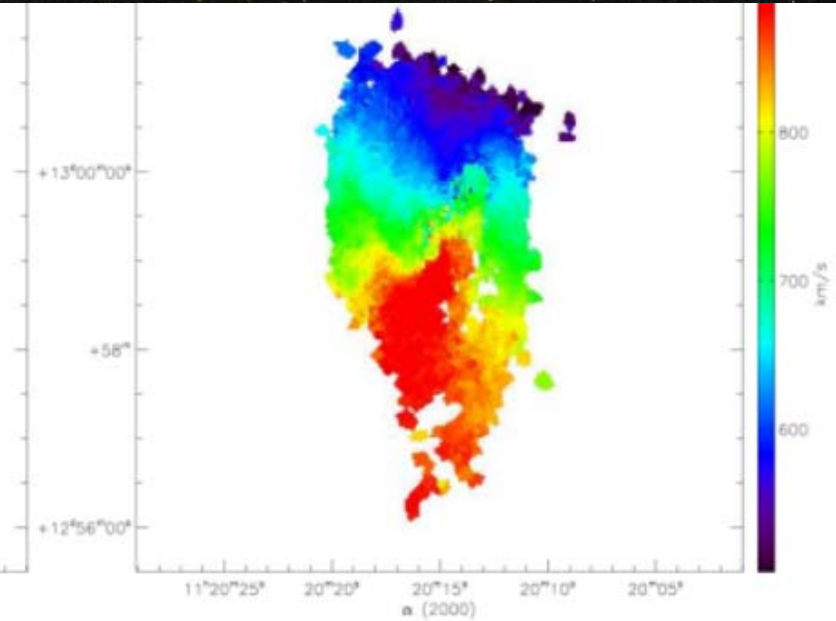
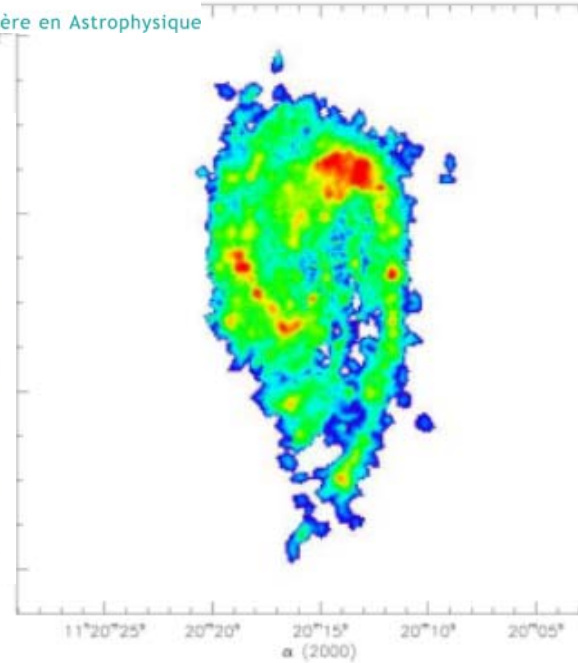
Laboratoire d'Étude du Rayonnement et de la Matière en Astrophysique



Amas de Galaxies  
ABELL 1689



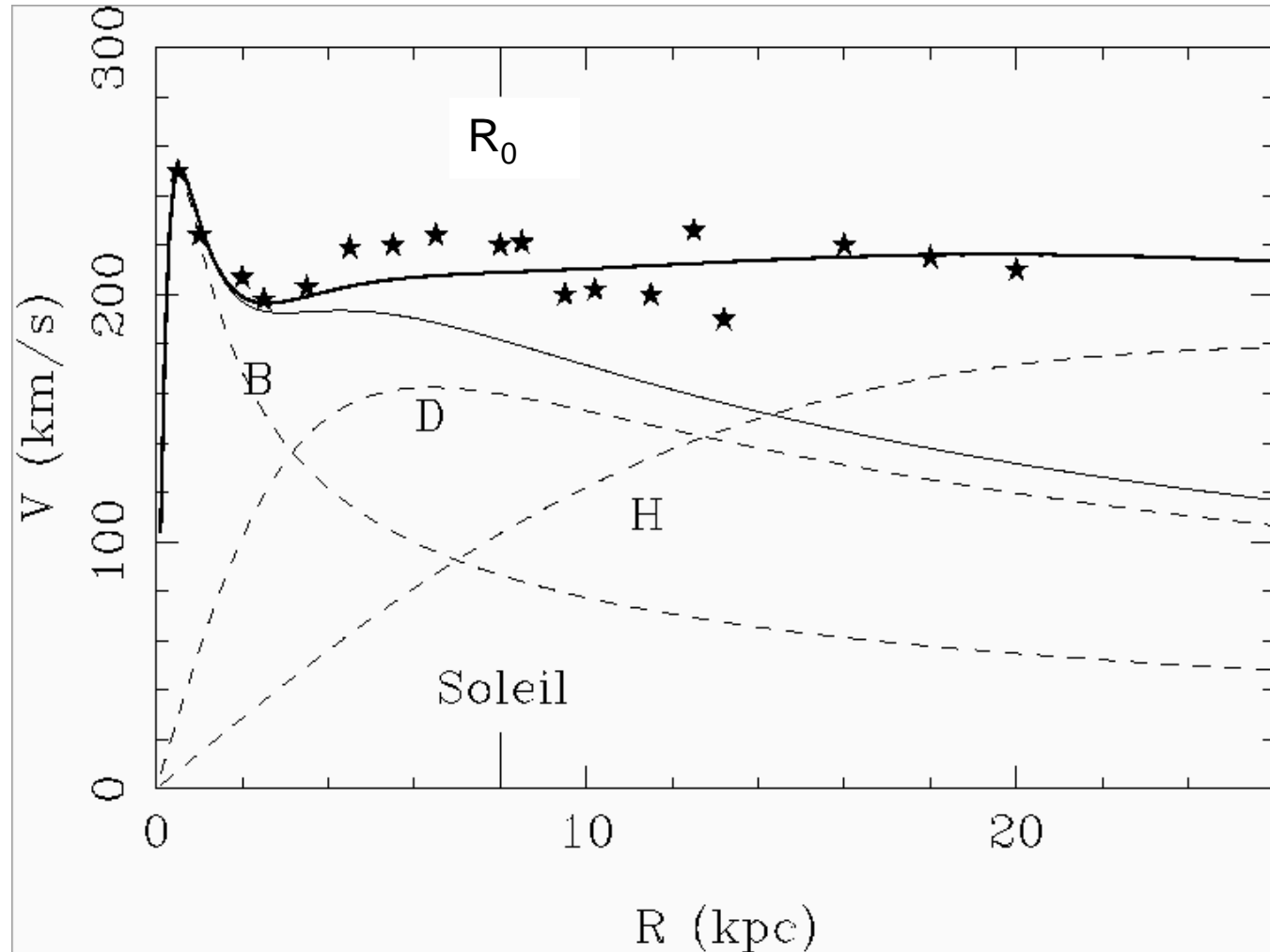
NGC 3627



# Evidences de la matière noire

→ Courbes de rotation, par ex notre Galaxie, la Voie Lactée

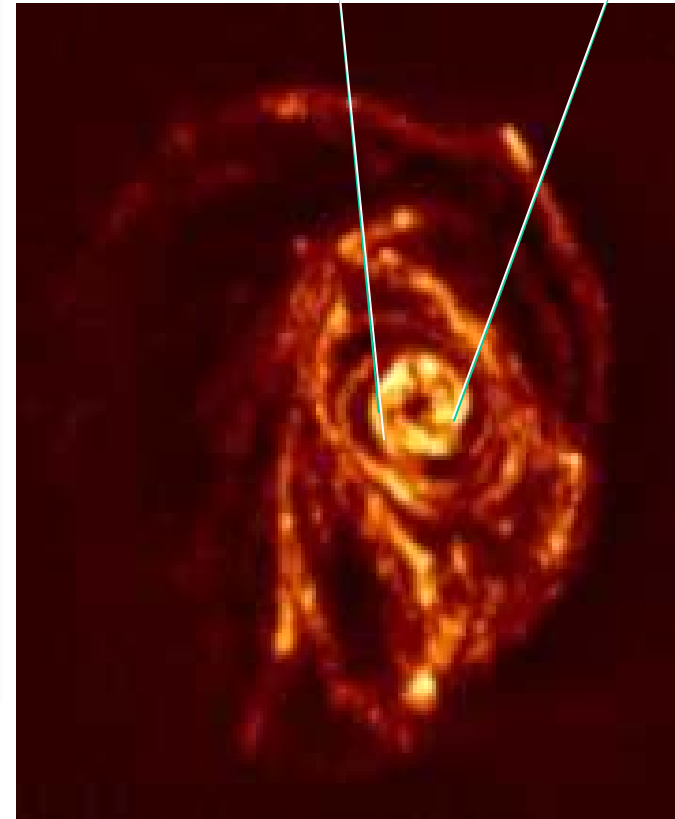
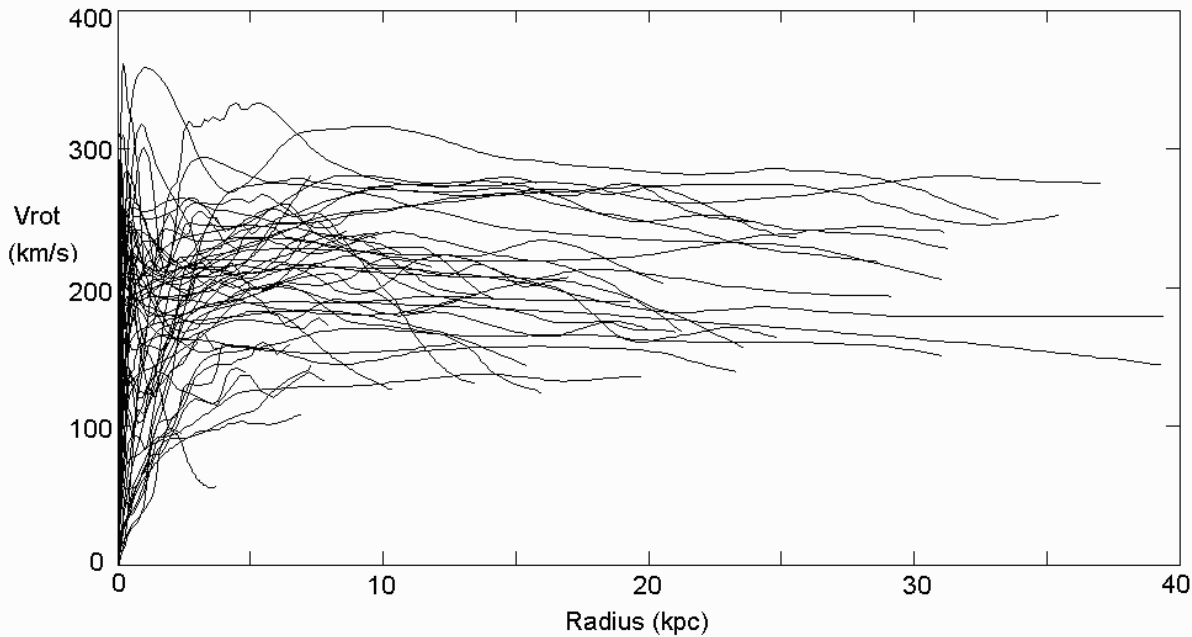
Bien au-delà de la masse visible, la vitesse reste grande, au lieu de  $V^2 \sim GM/r$  (Képler)



# Galaxies avec HI

M83: optique

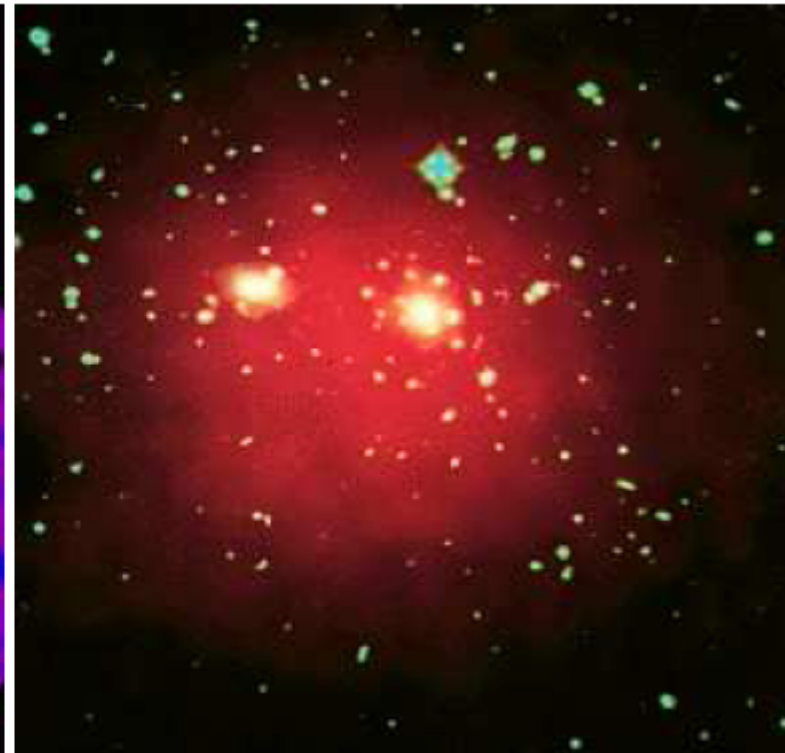
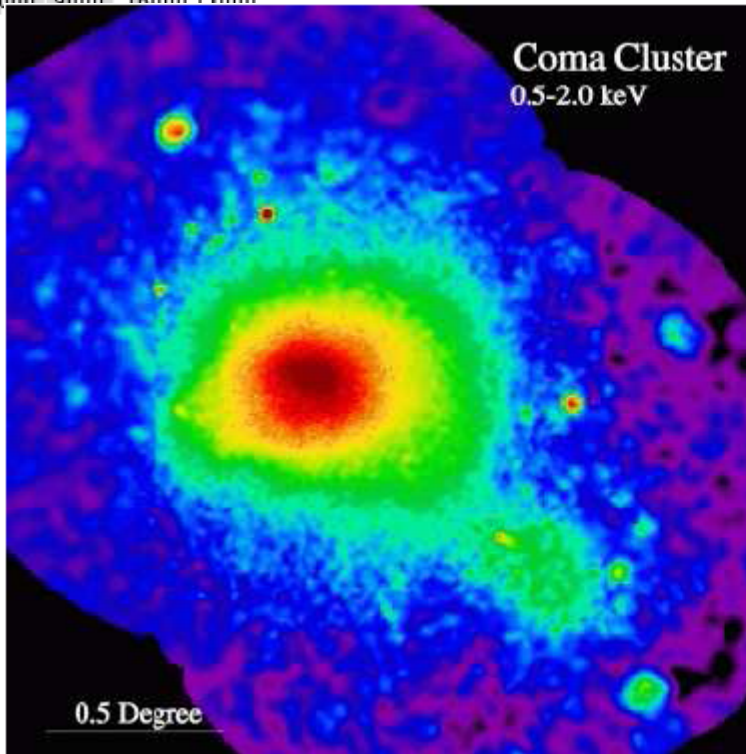
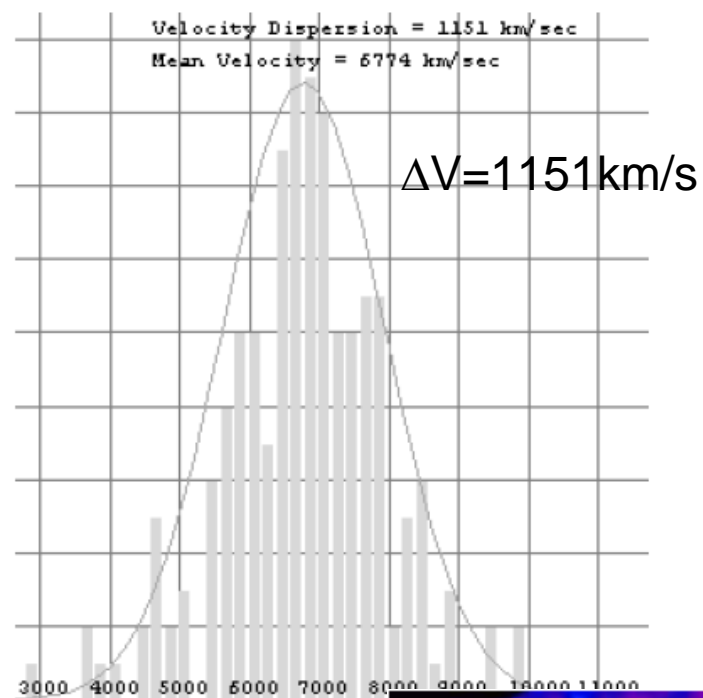
HI: cartographie de l'hydrogène atomique  
Longueur d'onde 21cm



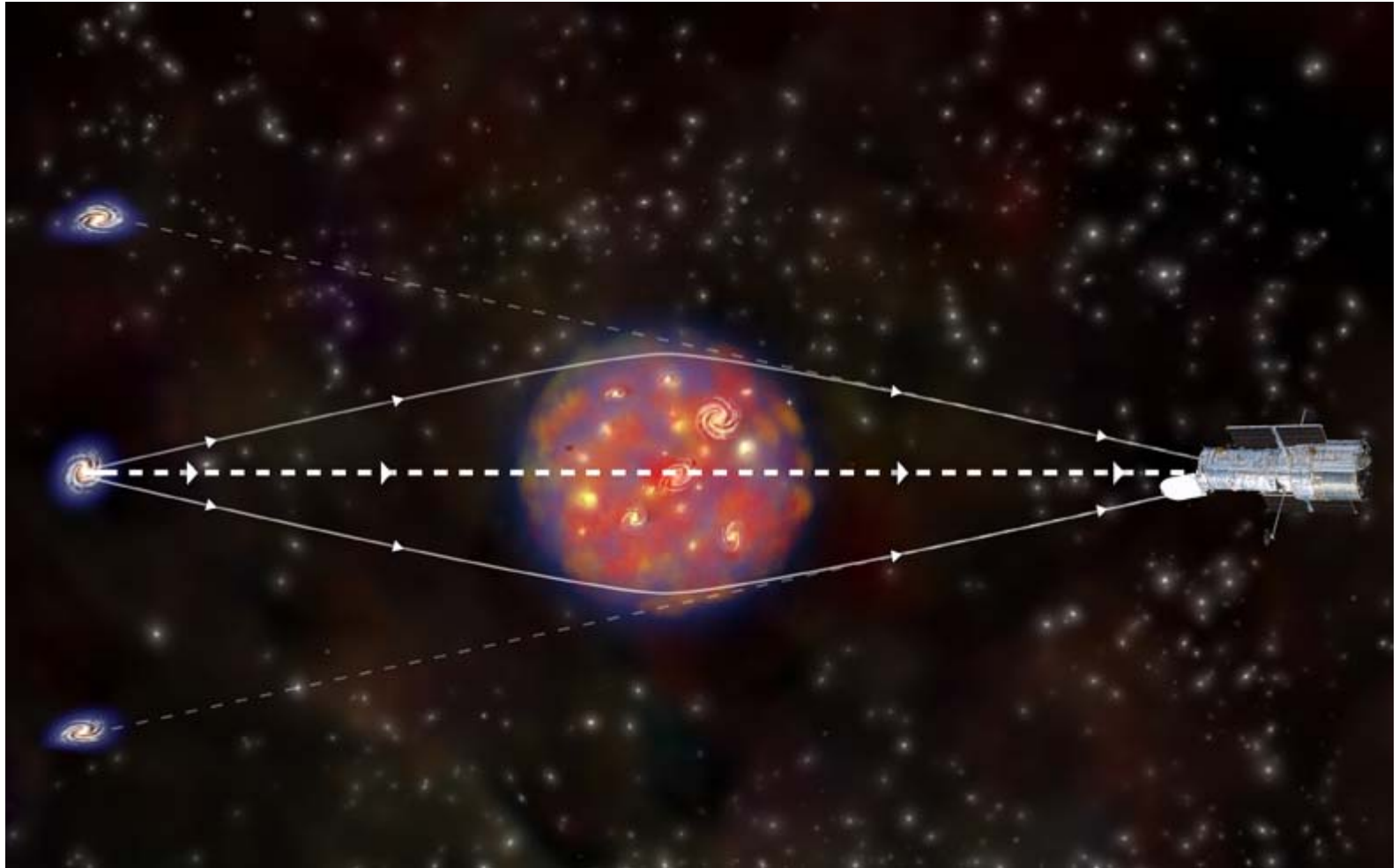
HI dans M83: une galaxie semblable à la Voie Lactée

# Matière noire dans les amas

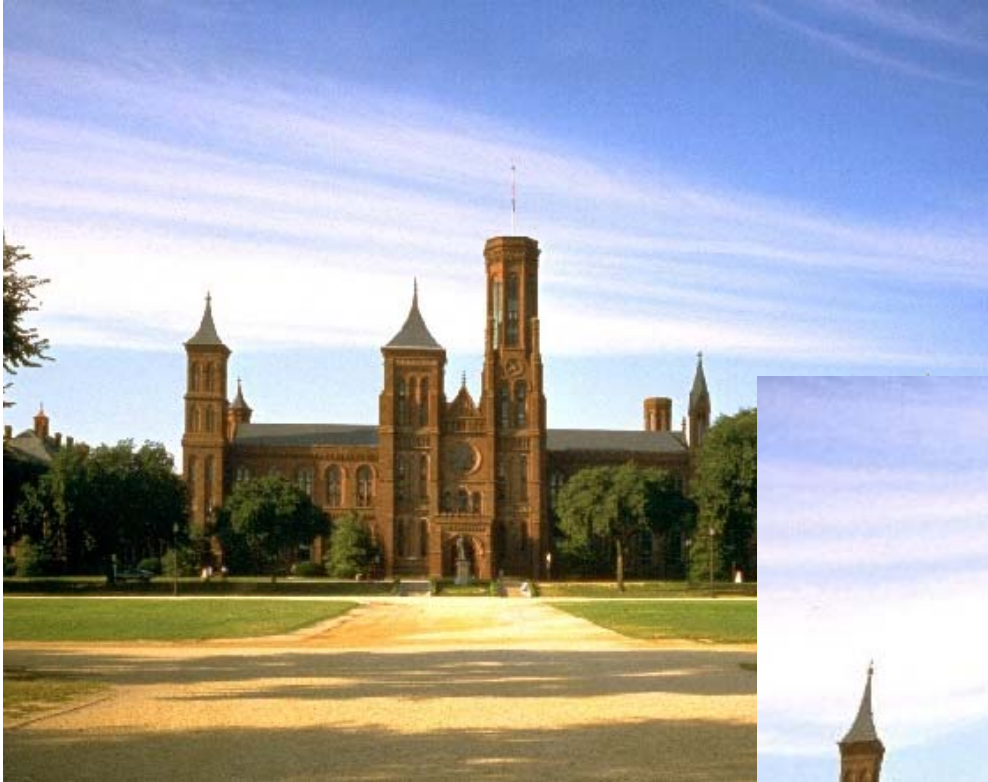
- Amas de galaxies,  
Masse viriel / masse visible ~100 (Zwicky 1937)  
Amas de Coma: vitesses des galaxies entre elles



# Lentilles gravitationnelles

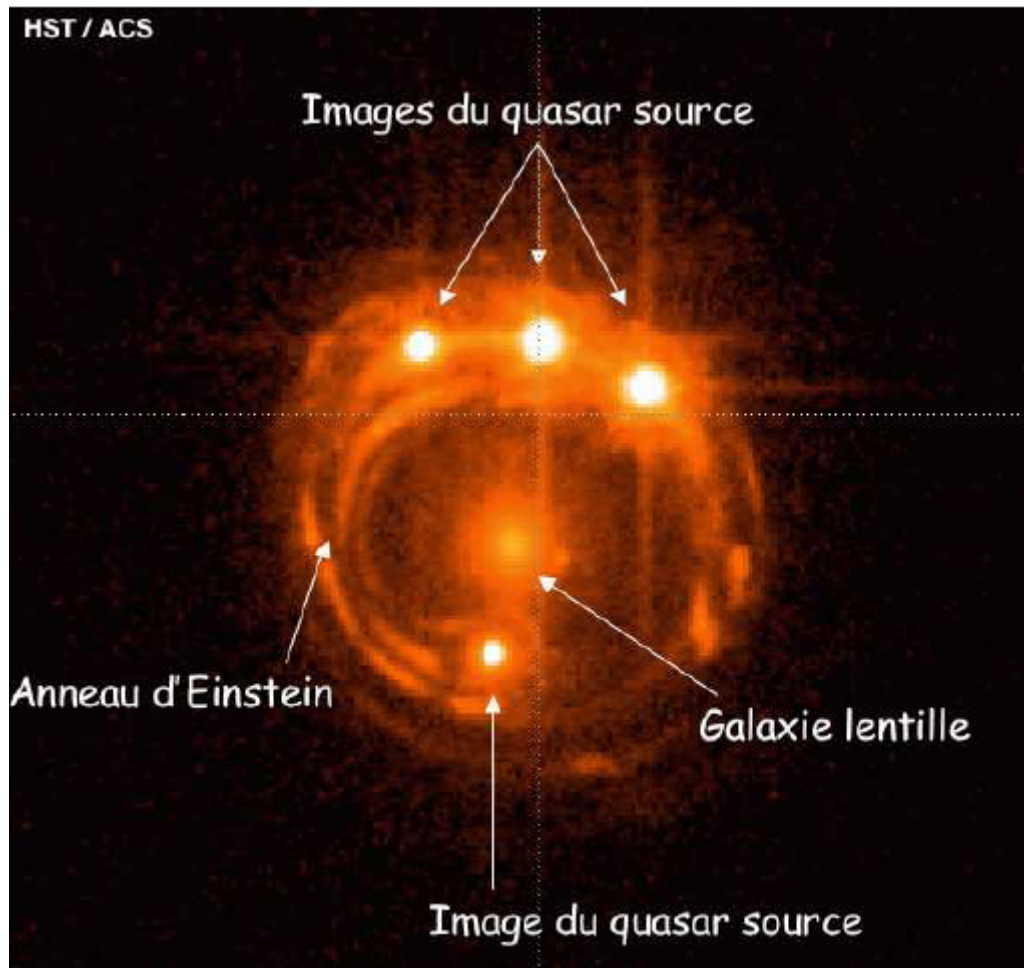


# Spectaculaires déformations



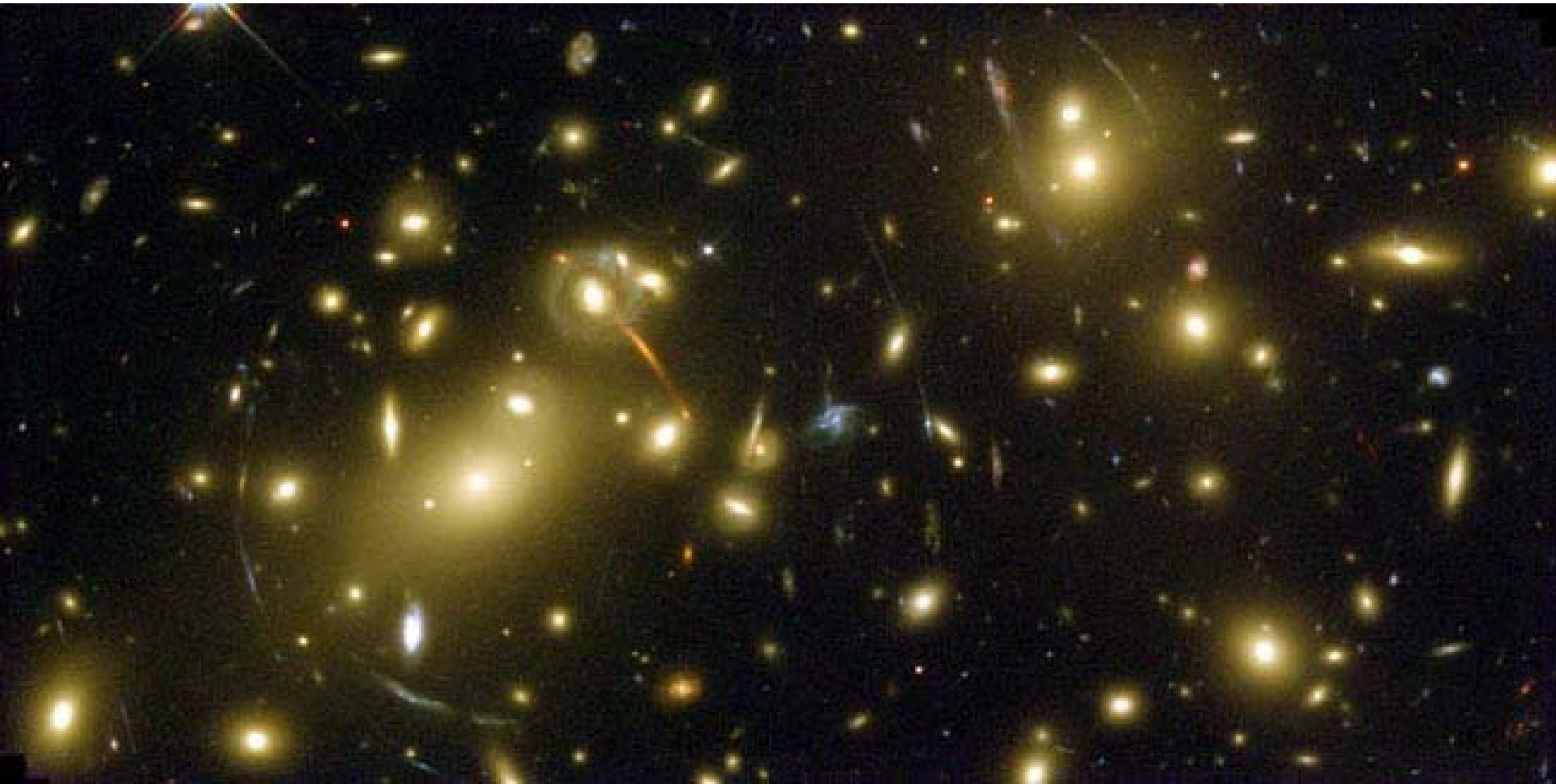
**CASTLES**= CfA-Arizona Space  
Telescope LEns Survey

# Images d'un quasar



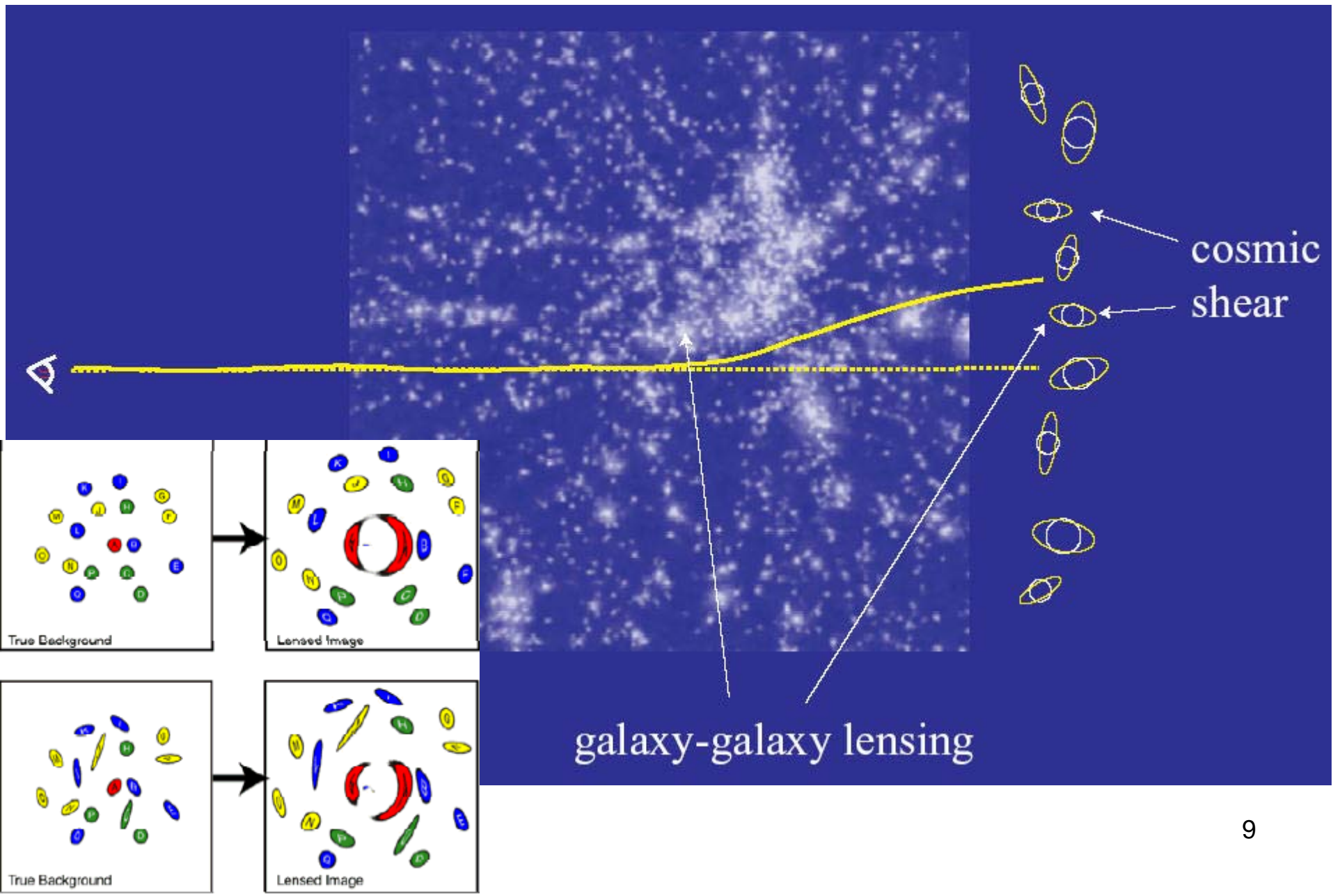
RXJ1131-1231

# Lentilles gravitationnelles: régime fort





# Lentilles gravitationnelles: régime faible

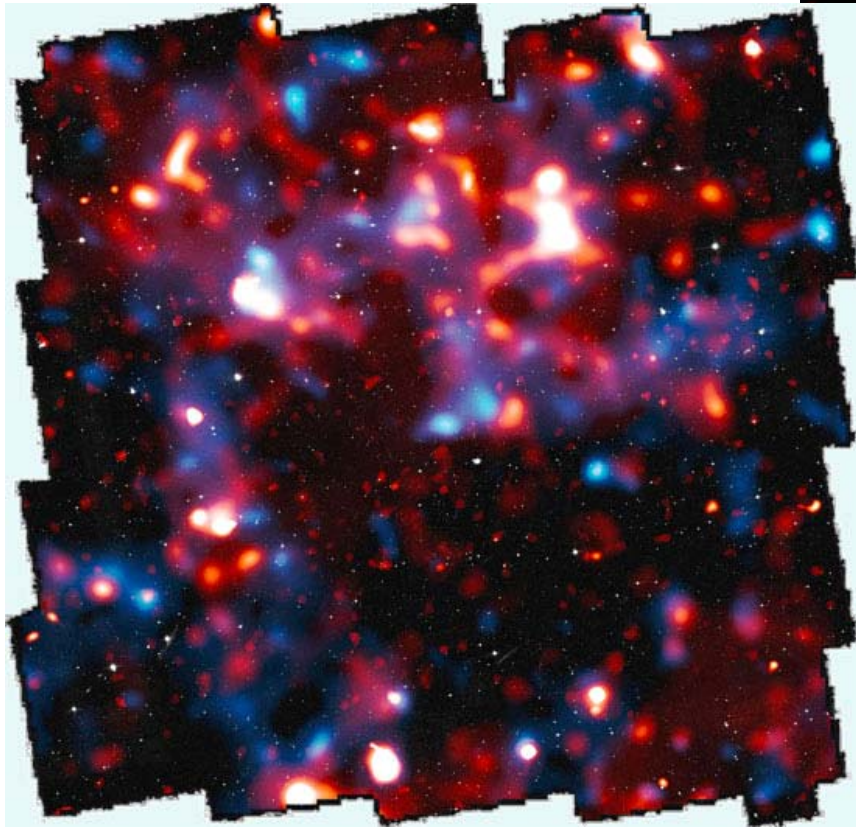
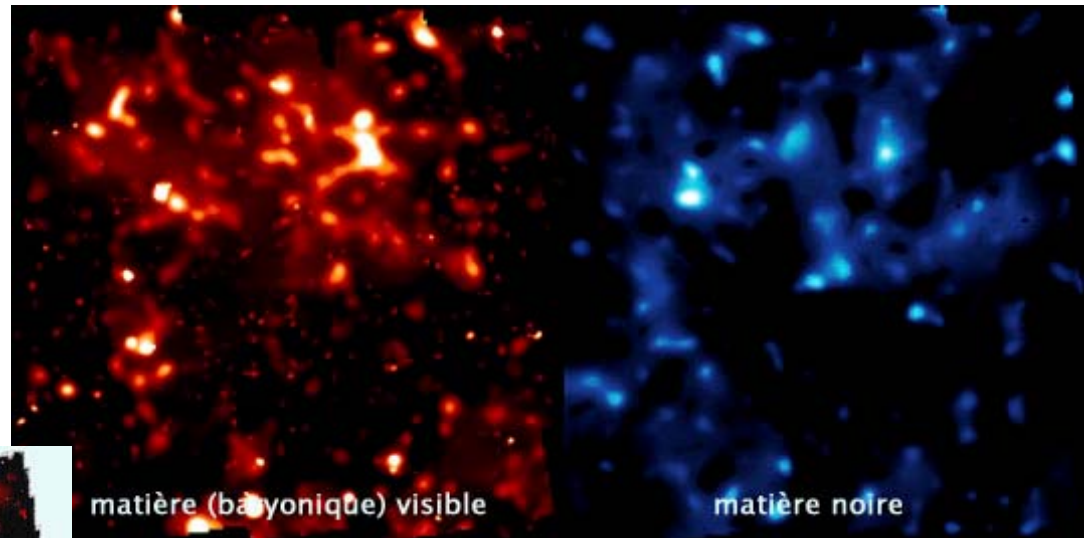


# Cisaillement gravitationnel

Rouge: gaz X

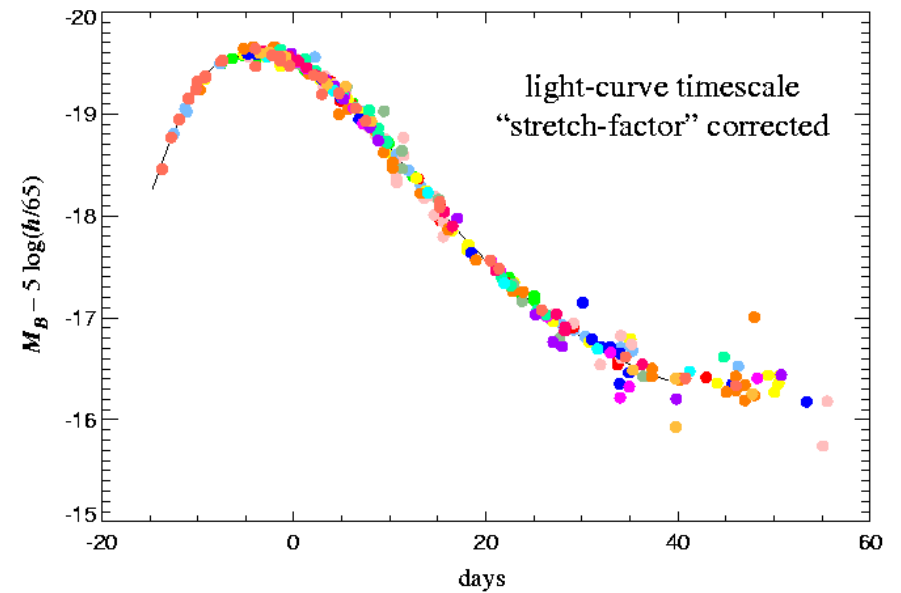
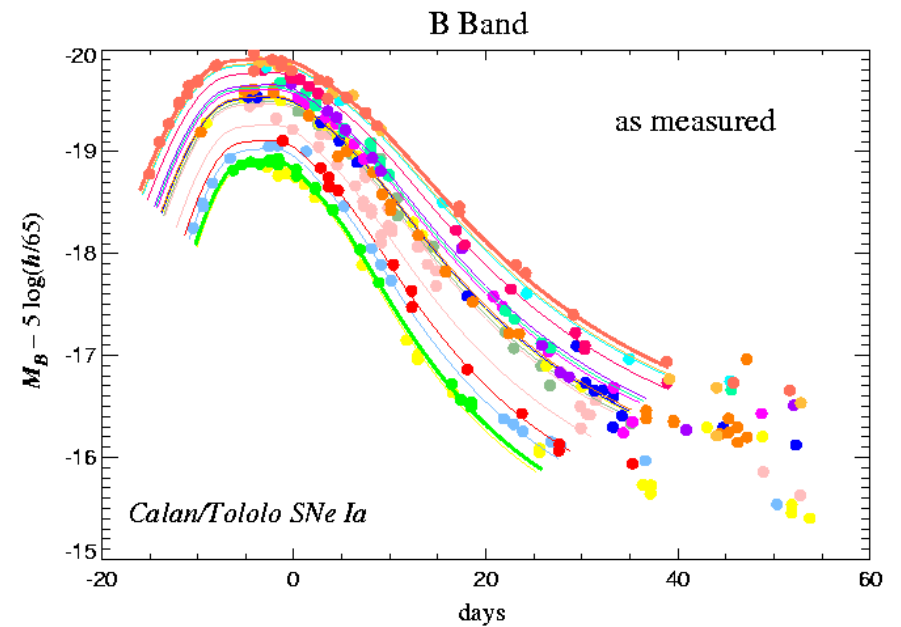
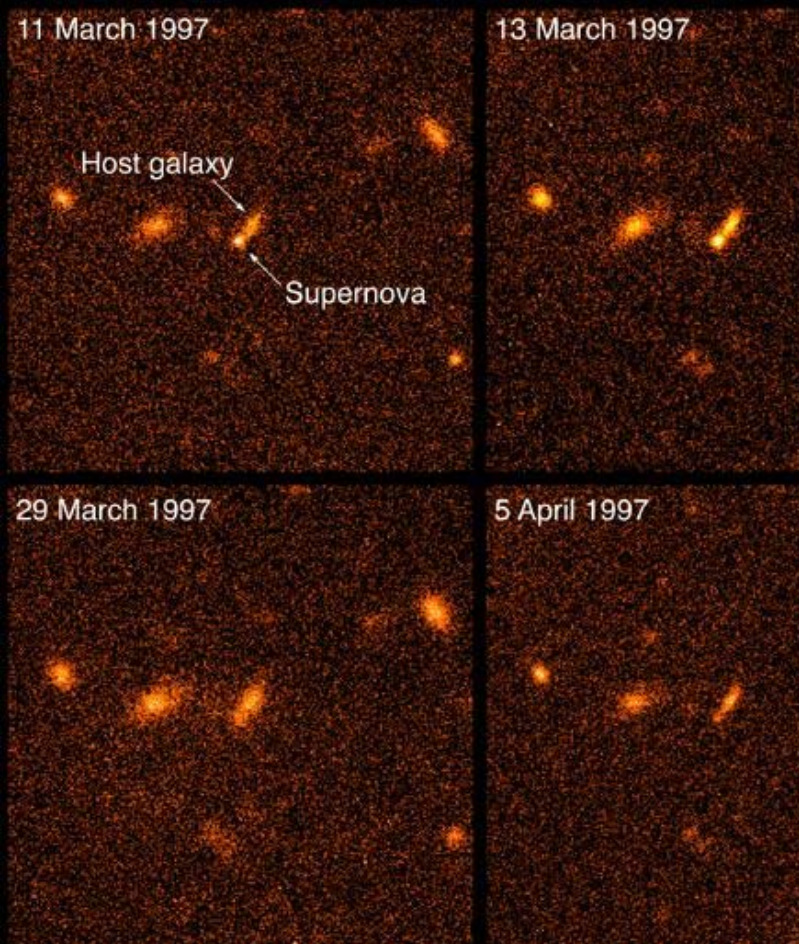
Bleu: matière totale

Champ Cosmos



**Contraintes sur la  
Matière noire, et aussi  
Énergie noire**

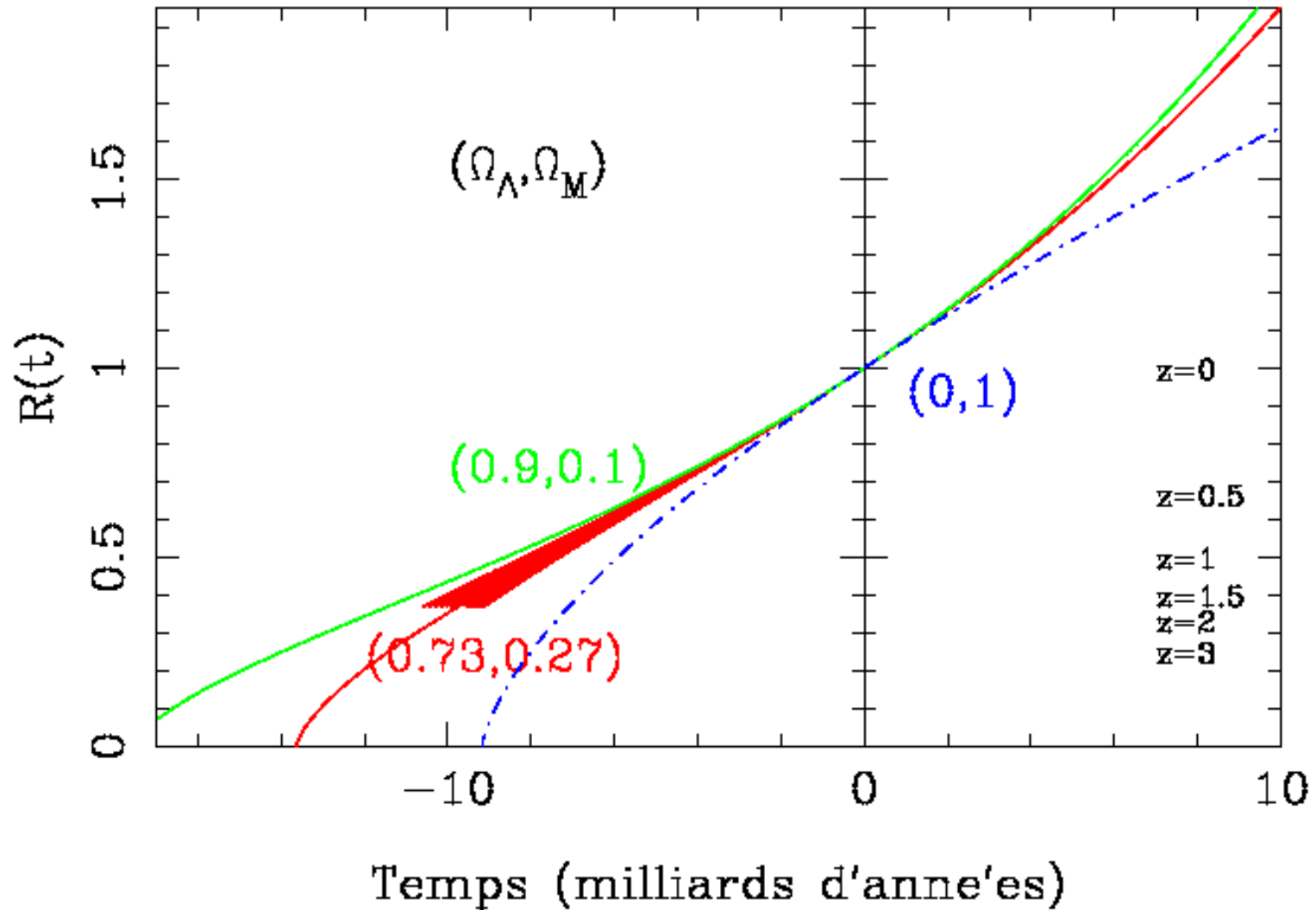
Massey et al 2007



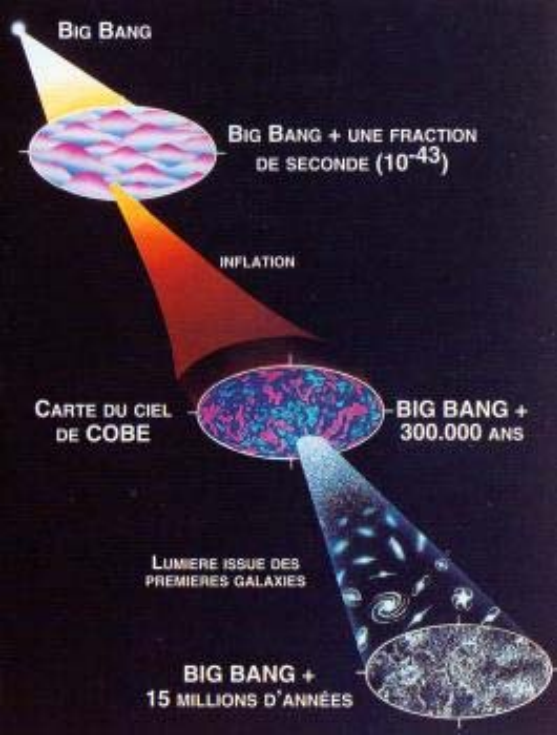
Kim, *et al.* (1997)

SNe Ia  
chandelles  
standard

# Supernovae à grand redshift



# Détection d'anisotropies dans le fond cosmique

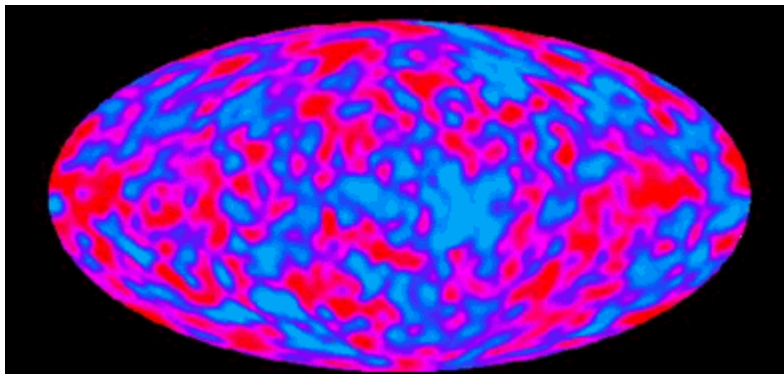


Dans les années 1990': COBE 7°

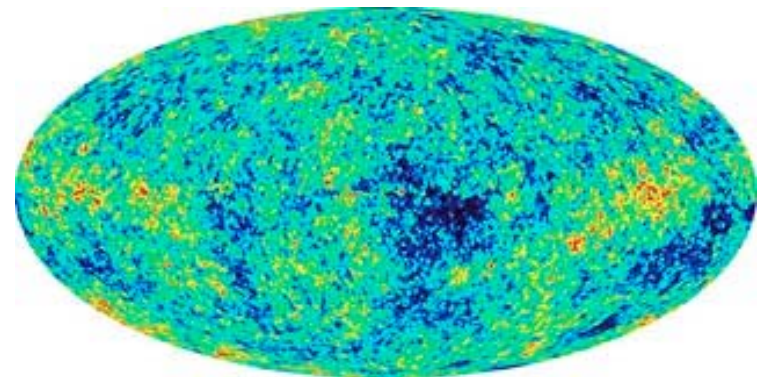
Années 2000': WMAP: 0.3° plus petite échelle

$\Delta T/T \sim 10^{-5}$  ! → matière noire non-baryonique

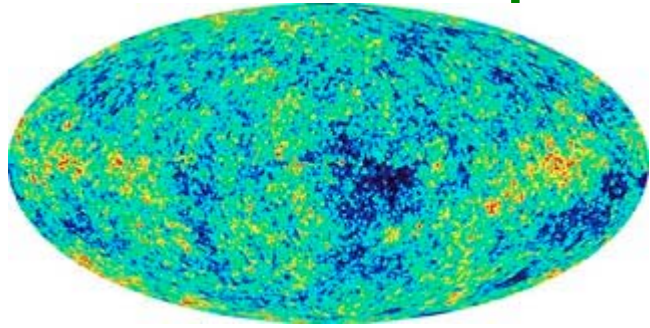
COBE



WMAP



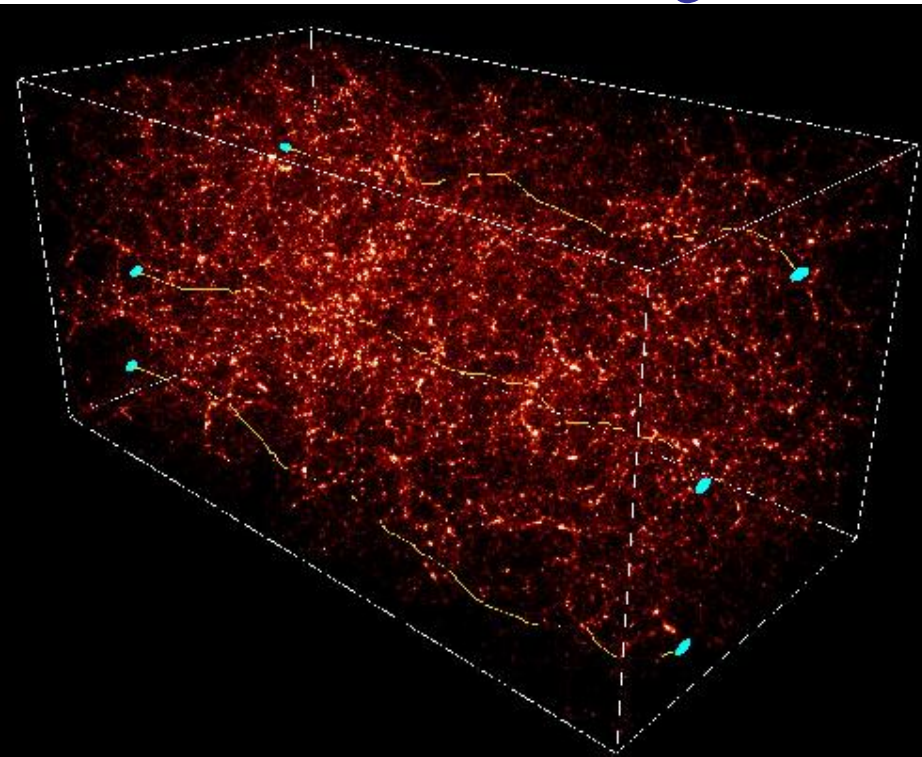
# Les paramètres de l'Univers



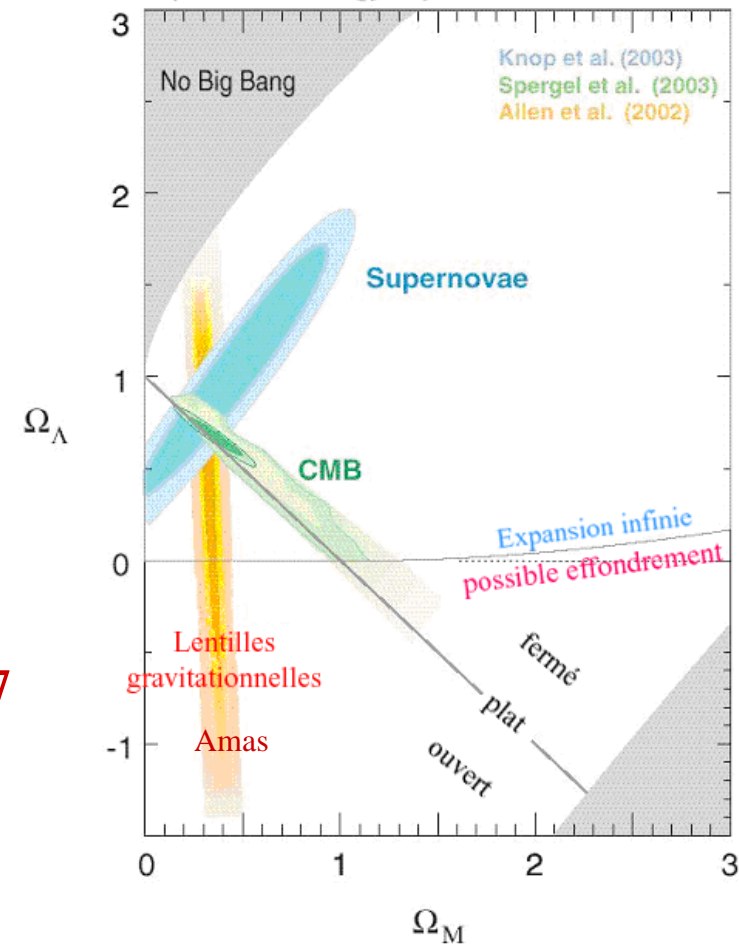
Anisotropies du fonds cosmique (WMAP)  
→ Univers plat

Observations des SN Ia

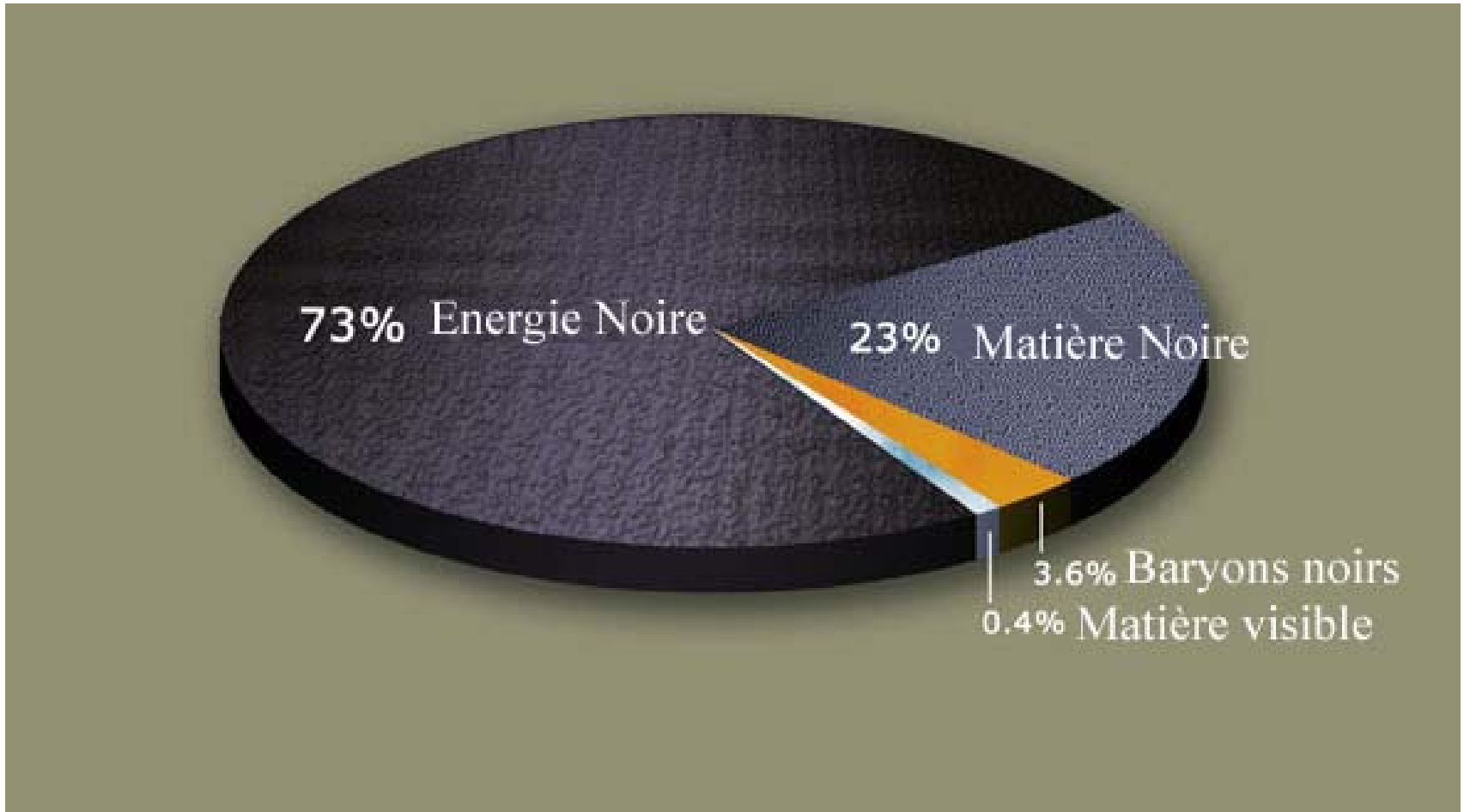
Amas, Lentilles gravitationnelles



$$\begin{aligned}\Omega_{\Lambda} &= 0.73 \\ \Omega_M &= 0.27 \\ \Omega_b &= 0.05\end{aligned}$$



# Contenu de l'Univers



# Hypothèses pour la Matière Noire

Particules qui au découplage ne sont plus relativistes

➔ Matière Froide CDM = "Cold Dark Matter"

Particules **WIMPS** ("weakly interactive massive particles")

**Neutralinos:** particule supersymétrique la plus légère LSP

Relique du Big-Bang, devrait se désintégrer en gamma

(40 Gev- 5Tev)

.....

Peut-être particules plus légères, ou avec plus d'interaction non-gravitationnelles?

**Axions** (solution au problème symétrie-CP,  $10^{-4}$  eV)

Trous noirs primordiaux?



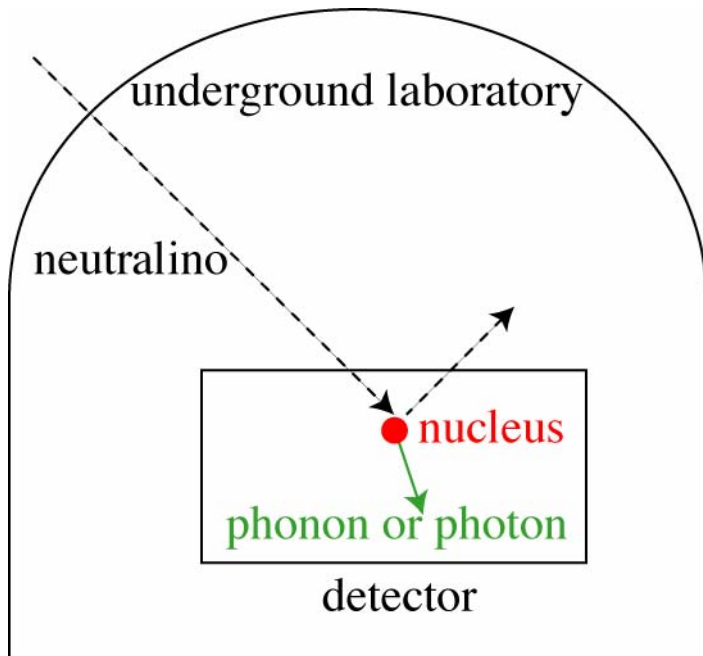
# Recherches directes et indirectes

Pourraient être formées dans les prochains accélérateurs (LHC, 14TeV)

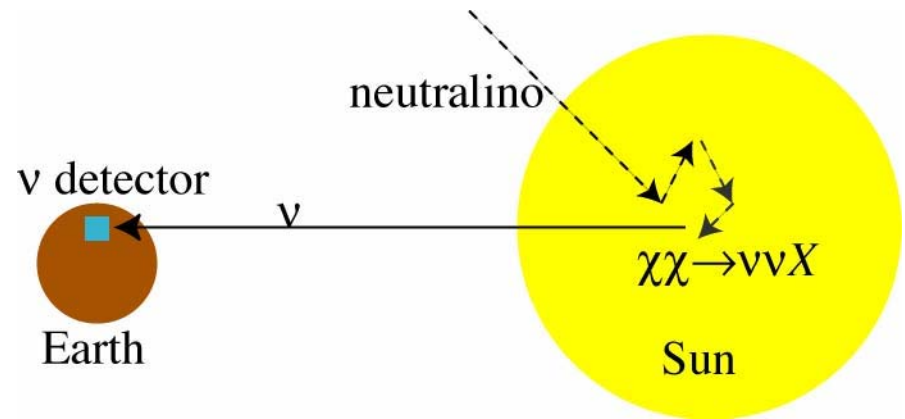
Recherche **directe**: CDMS-II, Edelweiss, DAMA, GENIUS, etc

**Indirecte**: rayons gamma de l'annihilation (Egret, GLAST, Magic)

**Neutrinos** (SuperK, AMANDA, ICECUBE, Antares, etc)



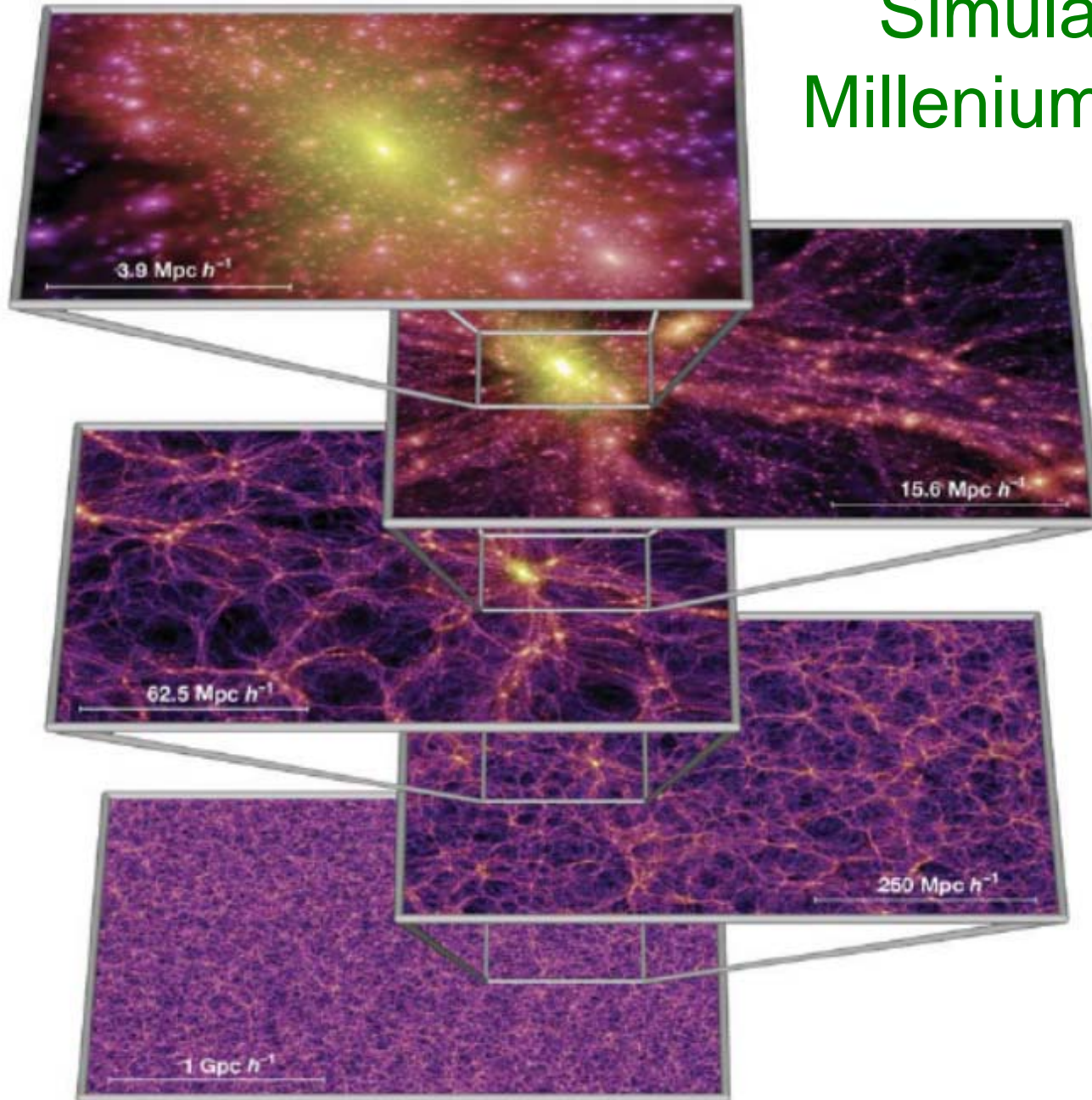
Direct



Indirect

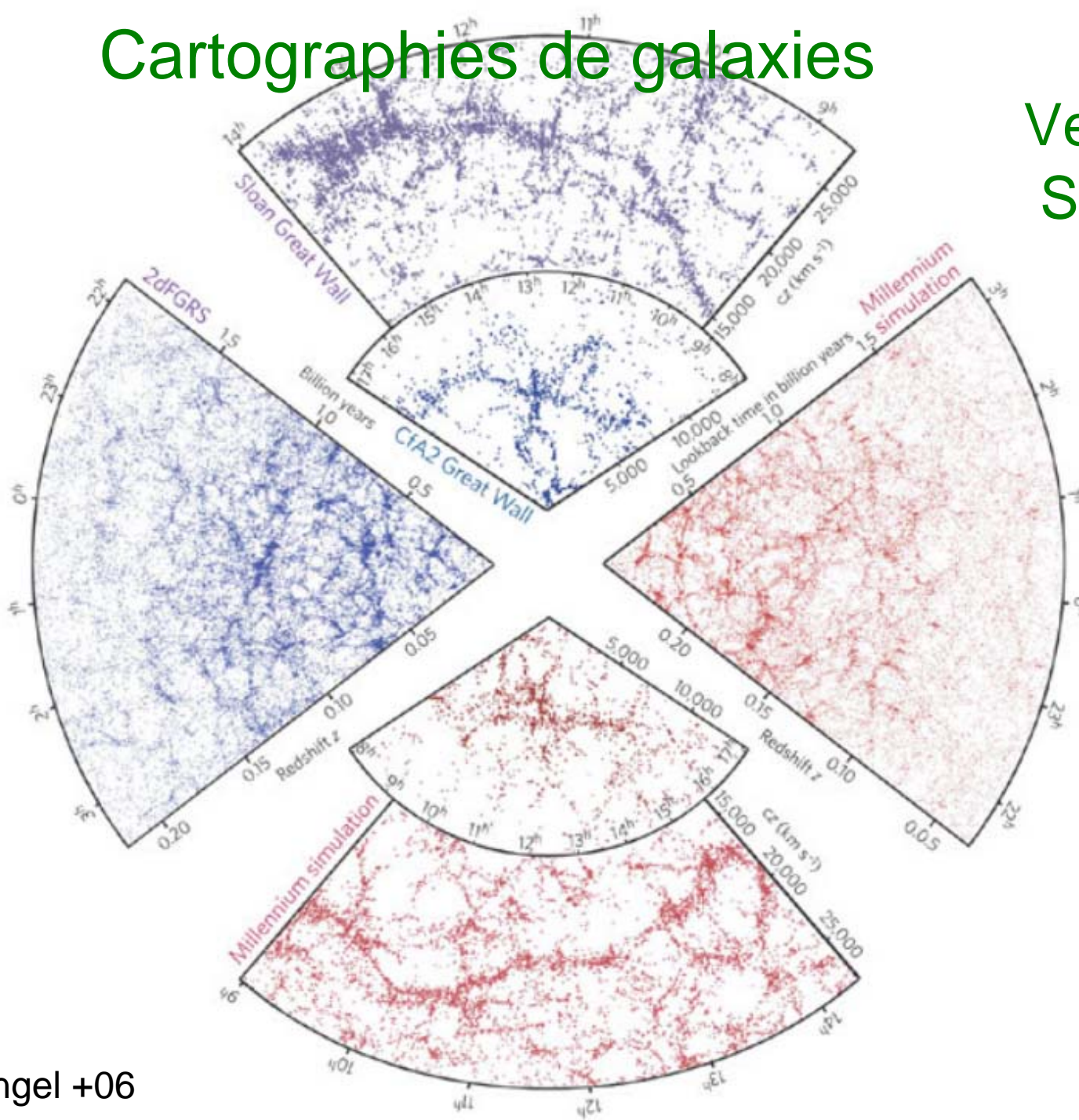
→ Pas de détection convaincante<sup>17</sup>

# Simulation Millenium CDM



# Cartographies de galaxies

Versus  
Simulations  
CDM



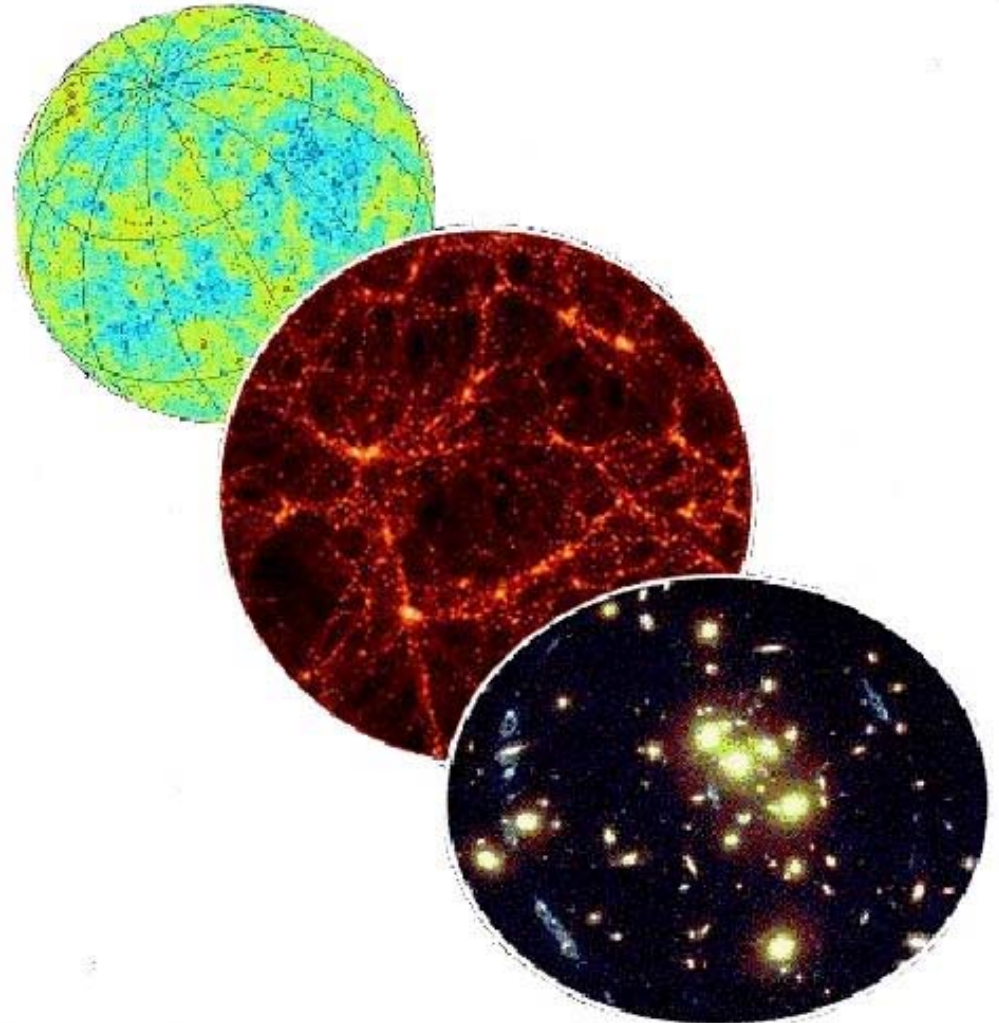
# Formation des structures

Fluctuations primordiales  
fond cosmologique

simulations cosmologiques:  
Nombre de structures à une  
échelle donnée

Contraintes sur la nature de  
matière noire (neutrinos?)

→ **Matière noire froide:**  
**CDM** (Cold Dark Matter)



Galaxies vues avec le HST

# Hypothèses pour les baryons noirs

Baryons en **objets compacts** (naines brunes, naines blanches, trous noirs) sont soit éliminés par les expériences de micro-lensing ou souffrent de problèmes majeurs

MACHOS --> MACDOS (objets du disque)

→ Meilleure hypothèse, **c'est du gaz**,

Soit **du gaz chaud** dans le milieu intergalactique et inter-amas

Soit **du gaz froid** au voisinage des galaxies

# Où sont les Baryons?

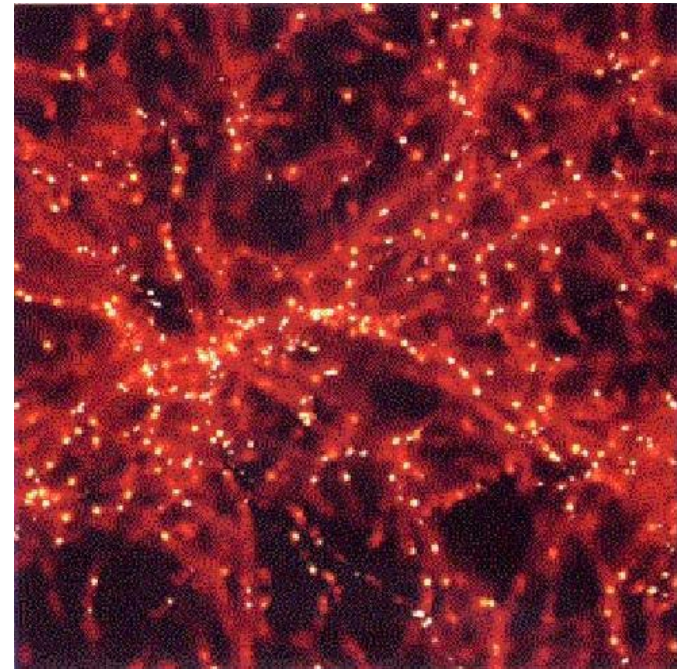
→ 6% dans les galaxies ; 3% dans les amas de galaxies gaz X

→ <18% dans la forêt Lyman-alpha (filaments cosmiques)

→ 5-10% dans le WHIM (Warm-Hot Intergalactic Medium)  $10^5$ - $10^6$ K  
Raies de OVI

→ 65% ne sont pas encore identifiés!

La majorité ne sont pas dans les galaxies



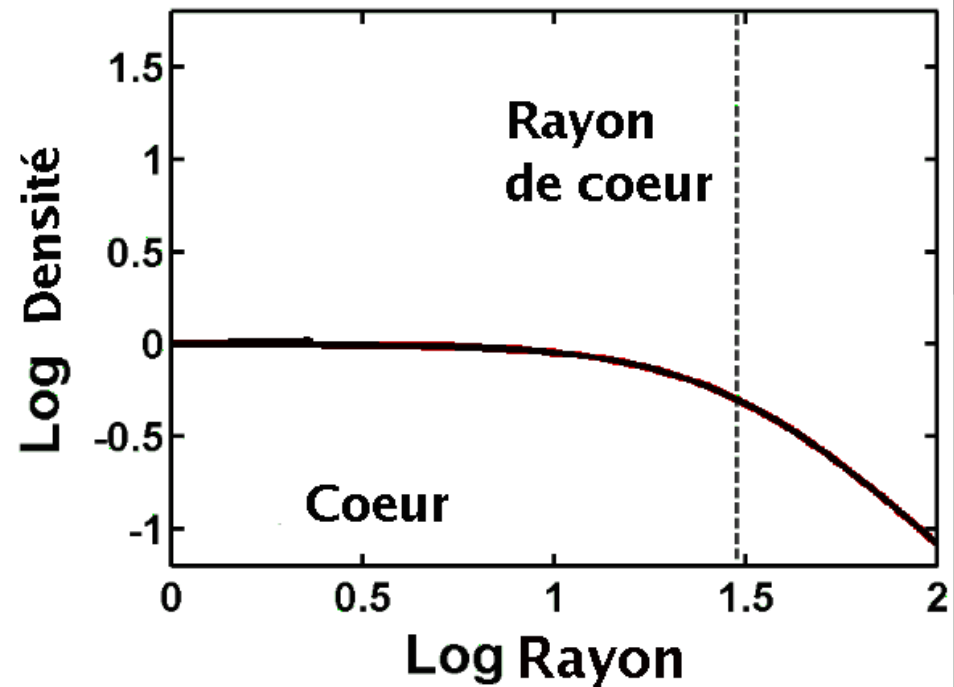
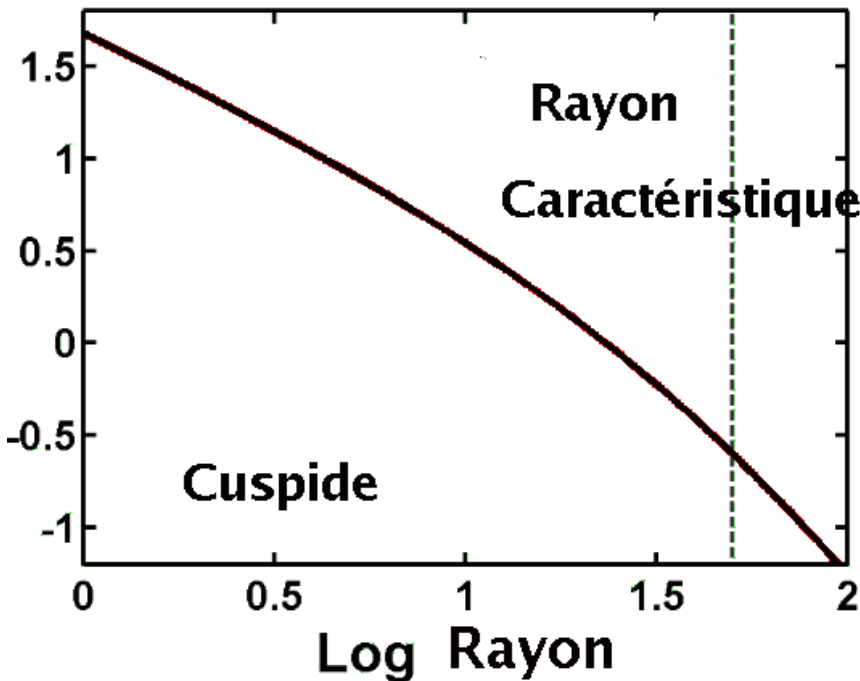
# Problèmes dans la formation des galaxies (modèle standard $\Lambda$ -CDM)

- Prédiction de "cuspidés" au centre des galaxies, absentes dans les observations
- Faible moment angulaire des baryons, et en conséquence formation de disques de galaxies 10 fois trop petits
- Prédiction d'un grand nombre de petits halos (400 autour de la Voie Lactée), non observés

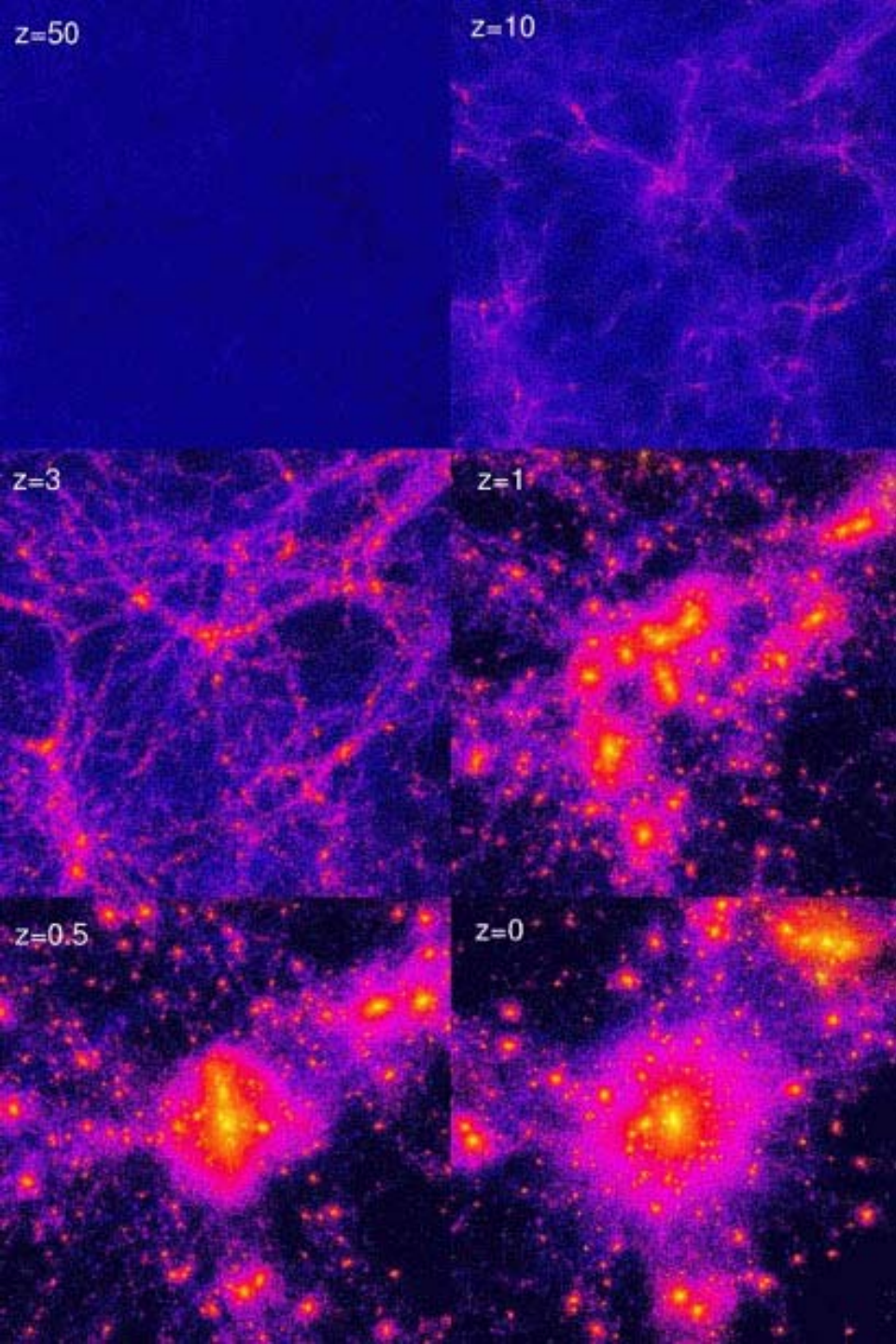
# Prédictions $\Lambda$ CDM: 'cuspidé' ou 'cœur'

Distribution radiale de la densité de matière noire

Loi de puissance de la densité  $\alpha \sim -1$ - $-1.5$ , observations  $\alpha \sim 0$

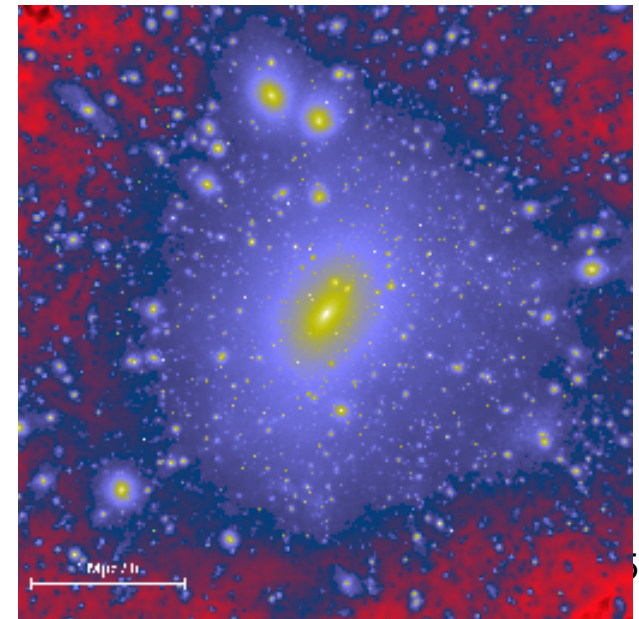


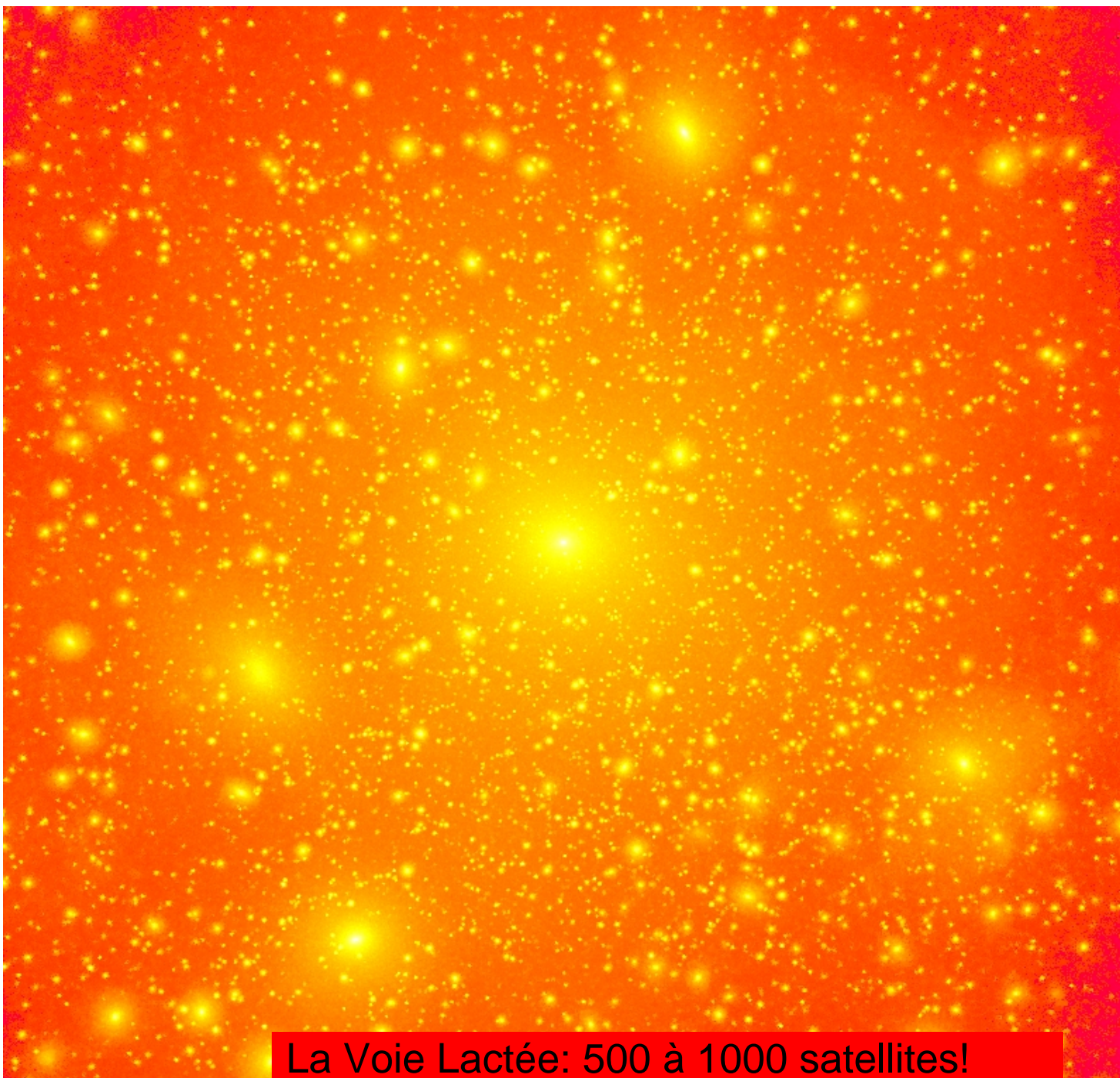




# Trop de petites structures

Aujourd'hui, les simulations CDM prédisent 100 fois trop de petits halos autour des galaxies comme la Voie Lactée



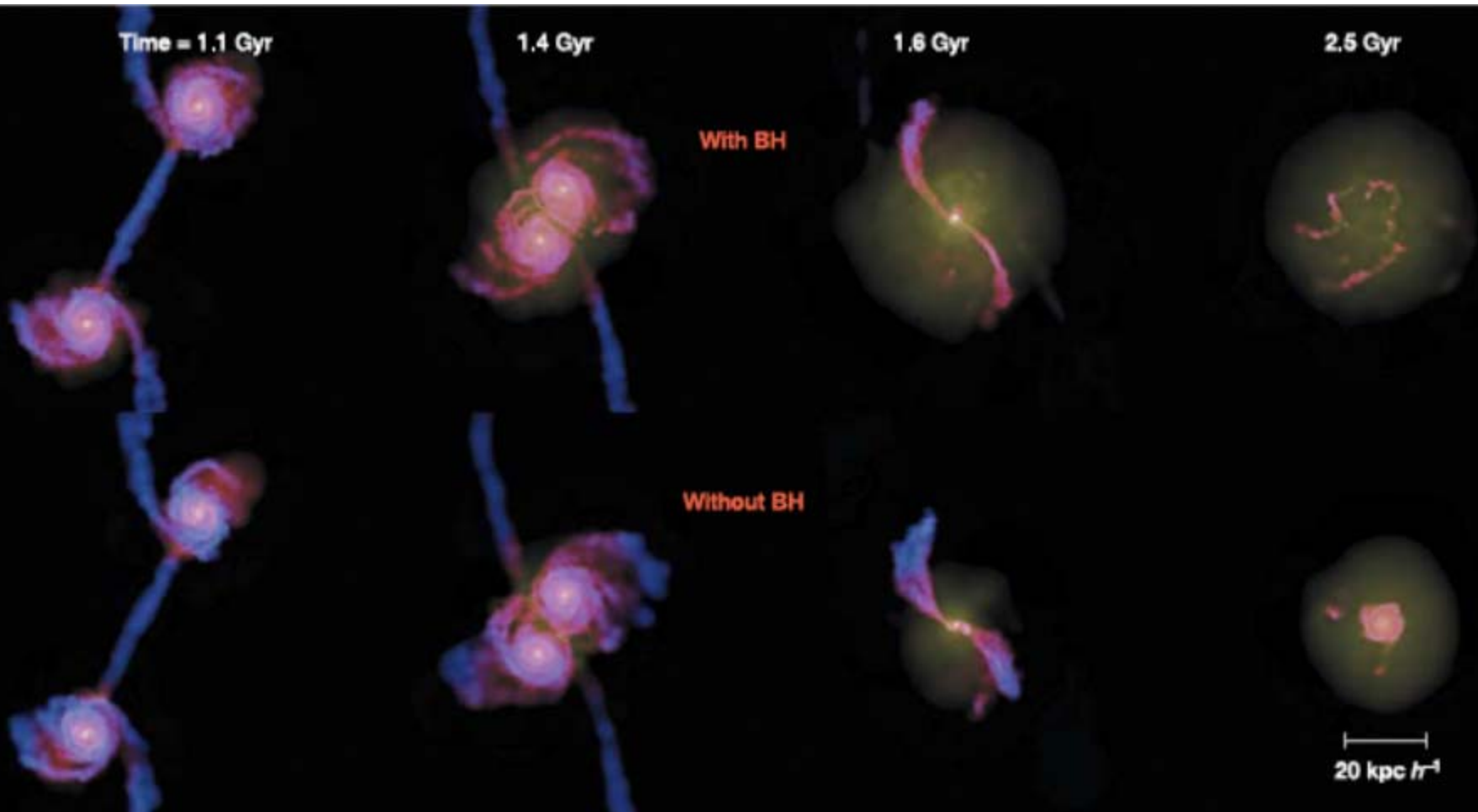


La Voie Lactée: 500 à 1000 satellites!

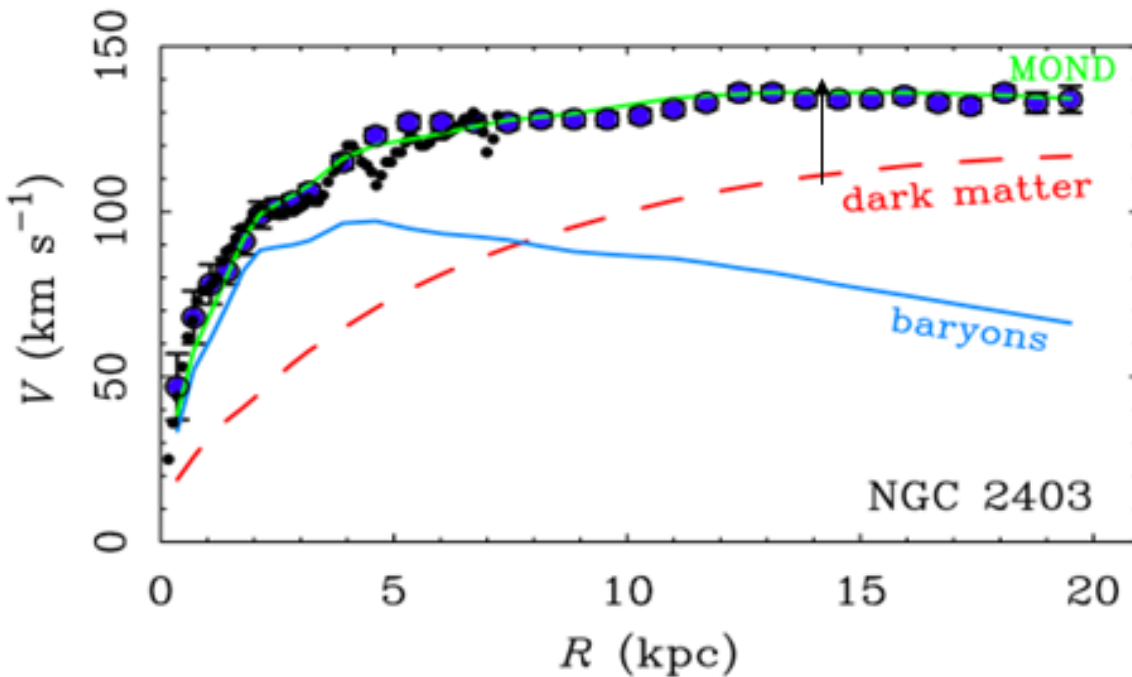
# Solutions Astrophysiques

## Flambées de formation d'étoiles

### Noyaux actifs, et rétro-action



# Autres solutions pour les courbes de rotation des galaxies



La matière noire peut résoudre le problème, mais aussi.....

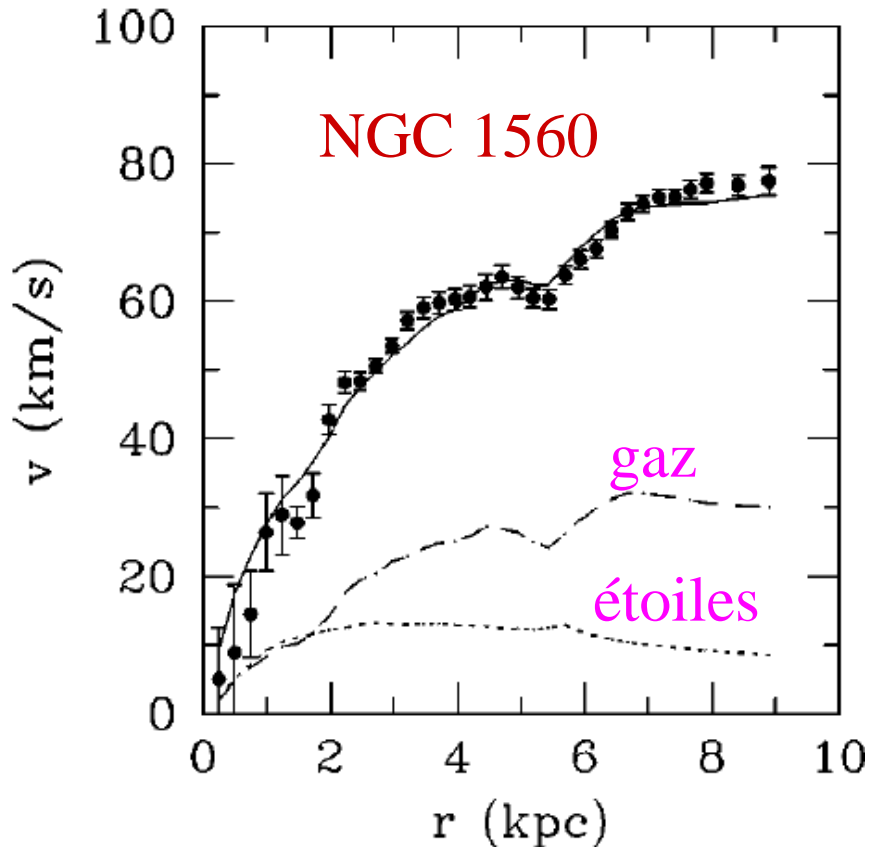
Une modification de la loi de Newton

# MOND: MOdified Newtonian Dynamics

**Milgrom (1983)**

$$\nabla \cdot [\mu(|\nabla\phi|/a_0)\nabla\phi] = 4\pi G\rho$$

$$\mu(x) = x \quad \text{si } x \ll 1 \\ = 1 \quad \text{si } x \gg 1$$



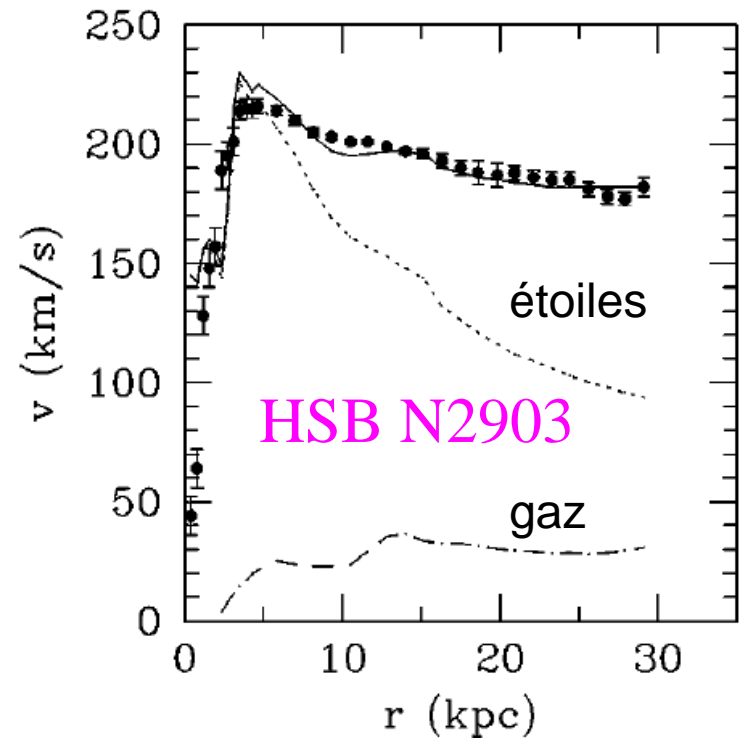
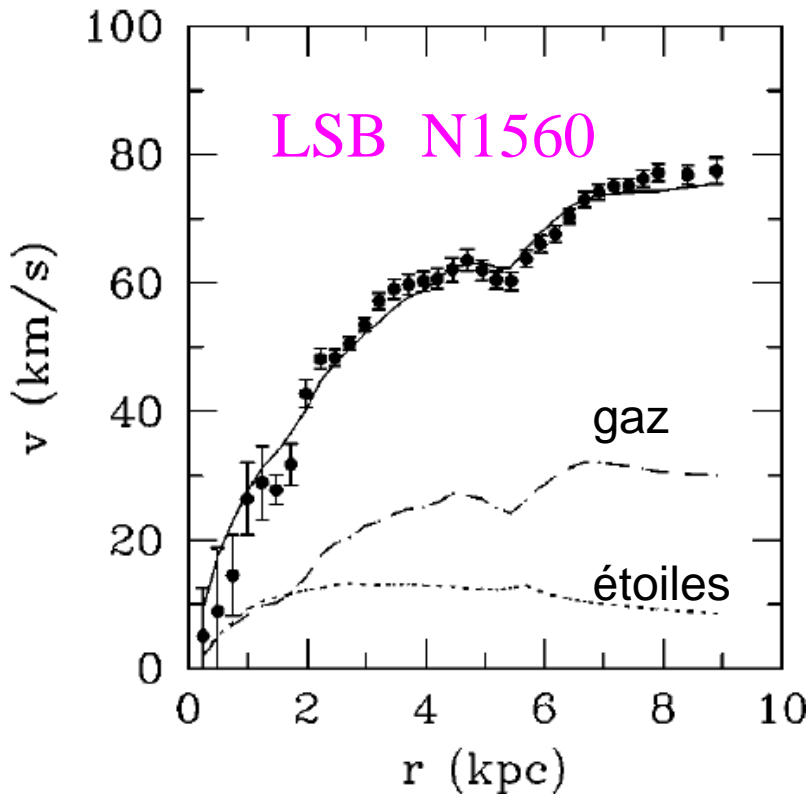
Quand l'accélération devient  $< a_0$   
 $a_0 \sim 2 \cdot 10^{-10} \text{ m/s}^2$

$$\rightarrow g_M = (a_0 g_N)^{1/2}$$

Potentiel logarithmique  
 $V \sim \log r$ , au lieu de  $1/r$

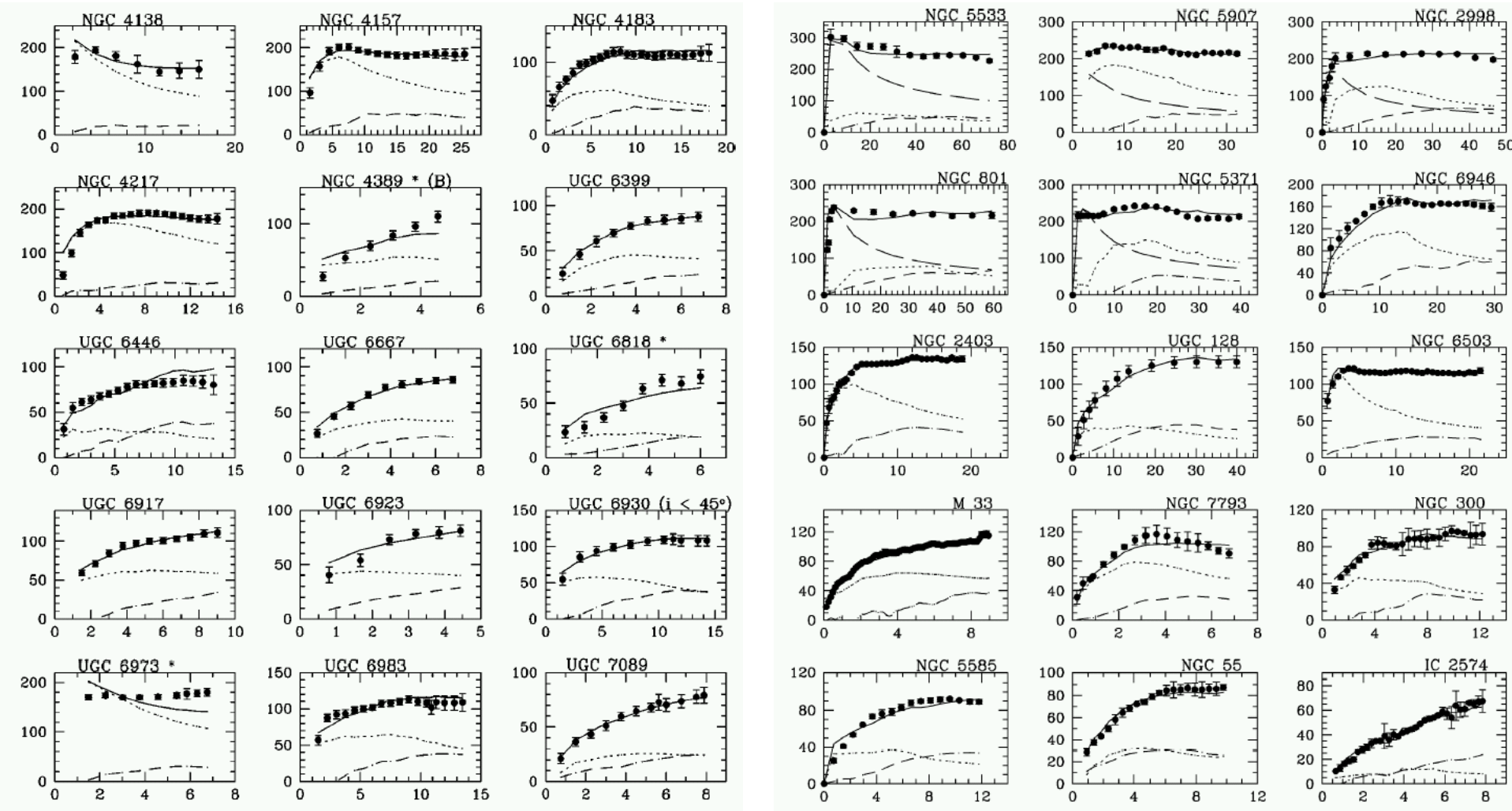
# Ajustement selon la densité de surface

Les courbes de rotation sont ajustées parfaitement, quel que soit le type morphologique (naines LSB, géantes HSB)



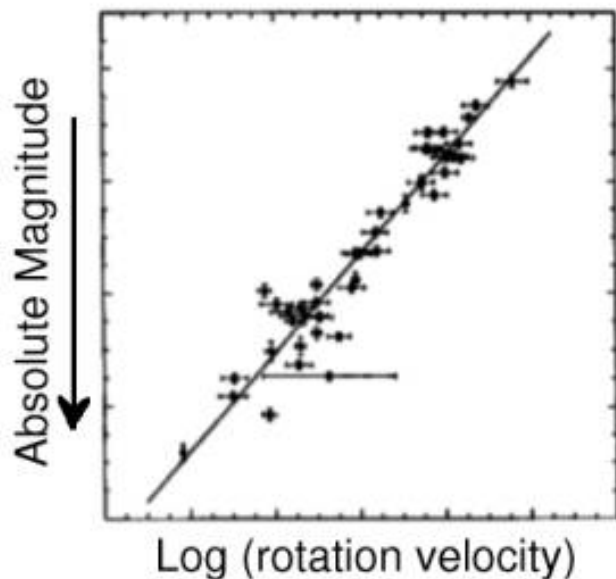
# Courbes de rotation multiples

Une seule constante  $a_0$  peut représenter toutes les galaxies



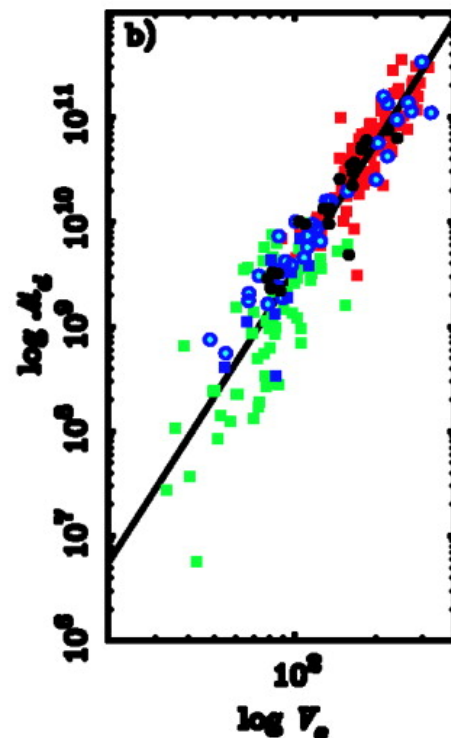
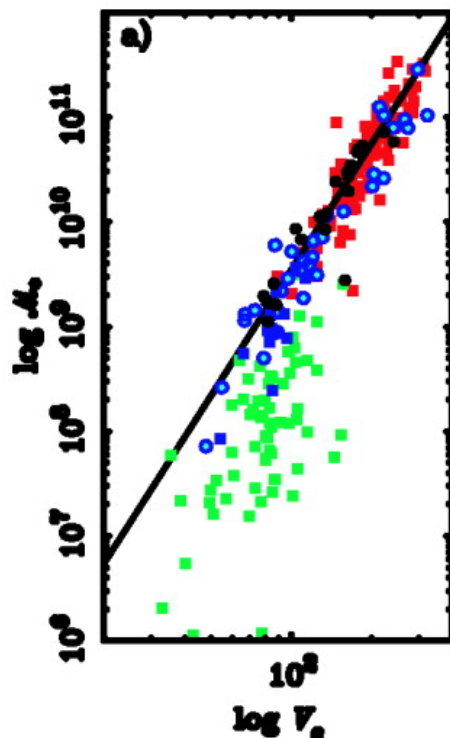
# Loi de Tully-Fisher

$$\text{Luminosité} \sim \Delta V_{\text{rot}}^4$$



$$g_M^2 = a_0 g_N = a_0 GM/r^2 = V^4/r^2$$

$$\rightarrow V^4 = a_0 GM$$



Les galaxies naines, dominées par le gaz, vérifient aussi la relation, si l'on prend en compte la masse HI



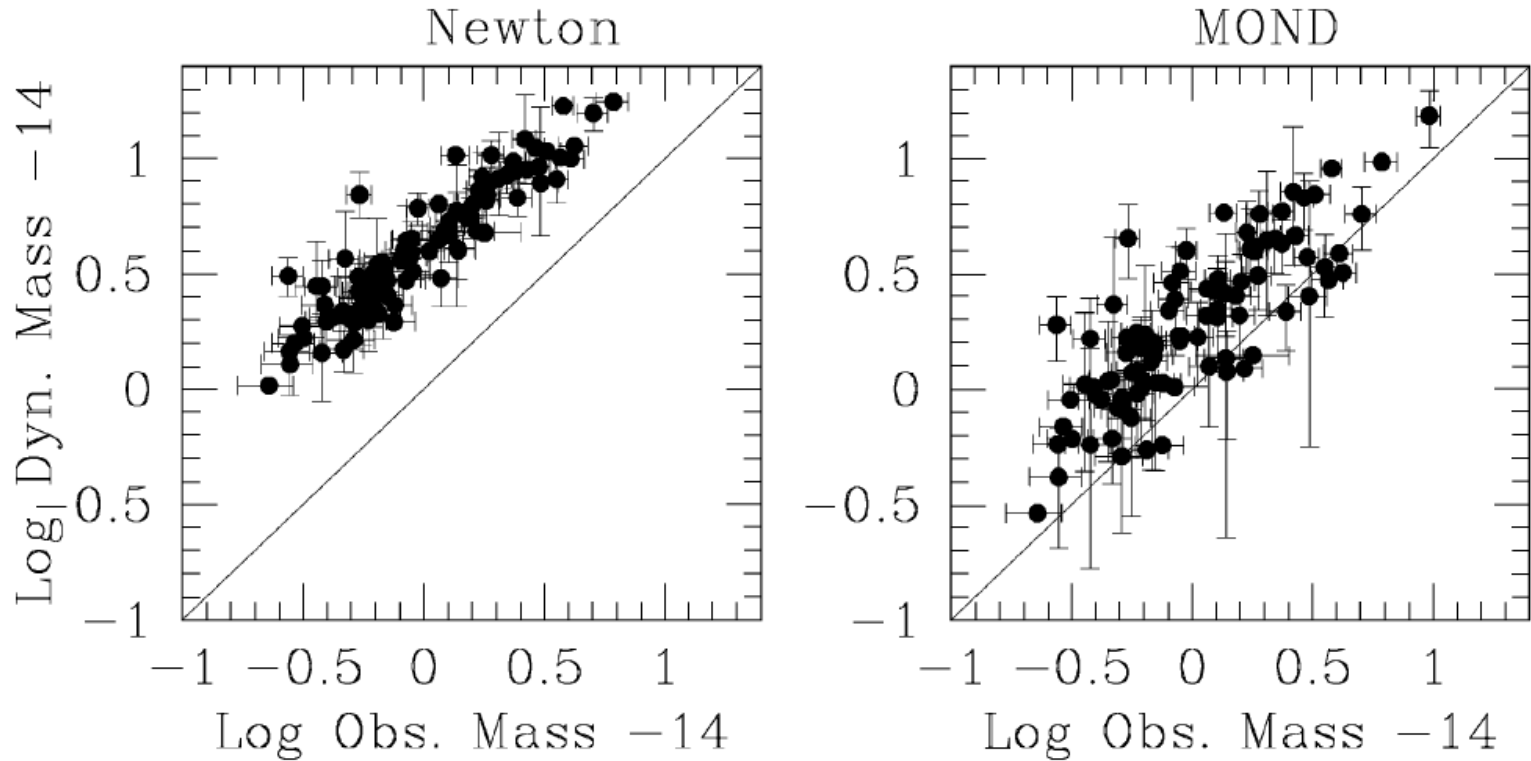
# Problèmes de MOND dans les amas

A l'intérieur des amas de galaxies, il existe encore de la DM, qui ne peut pas être expliquée par MOND, car **le centre de l'amas** n'est que modérément dans le régime MOND ( $0.5 a_0$ )

MOND réduit d'un facteur 2 la masse manquante

➔ Il reste une autre composante, qui pourrait être des neutrinos....  
(plus des baryons)

# MOND et les amas



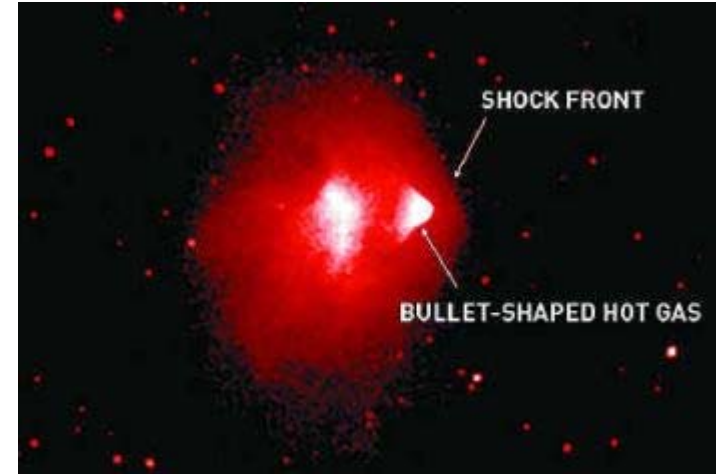
Du gaz froid pourrait se trouver au centre des amas

(flots de refroidissement)

D'autre part, les neutrinos pourraient représenter 2x plus de masse que les baryons

# L'amas du boulet

Gaz X

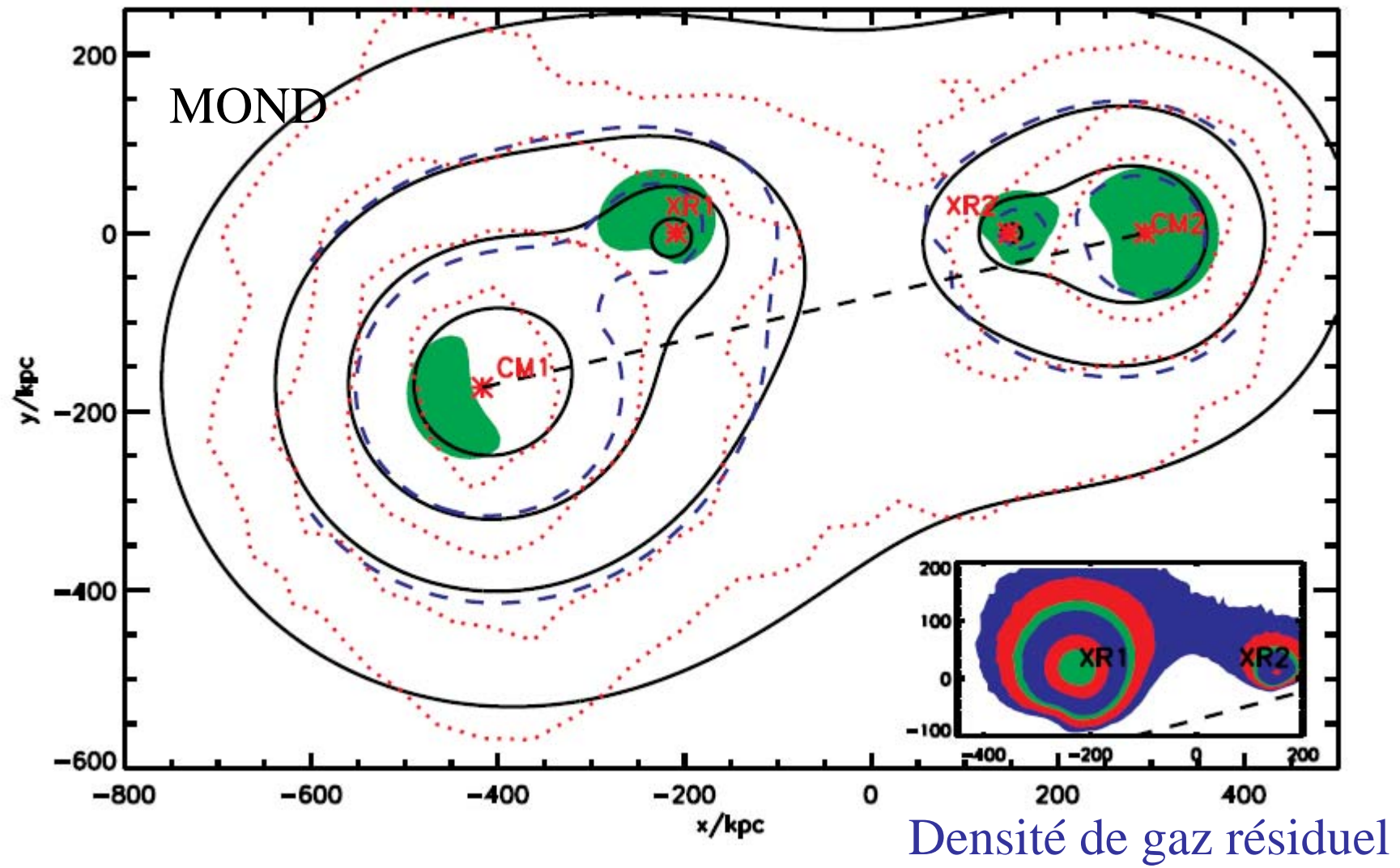


Masse totale

Est-ce la preuve de l'existence de matière non-baryonique?

Possible d'expliquer les observations avec MOND et les neutrinos, avec le pourcentage habituel (masse 1-2 eV)

# Modèle de l'amas du boulet dans MOND

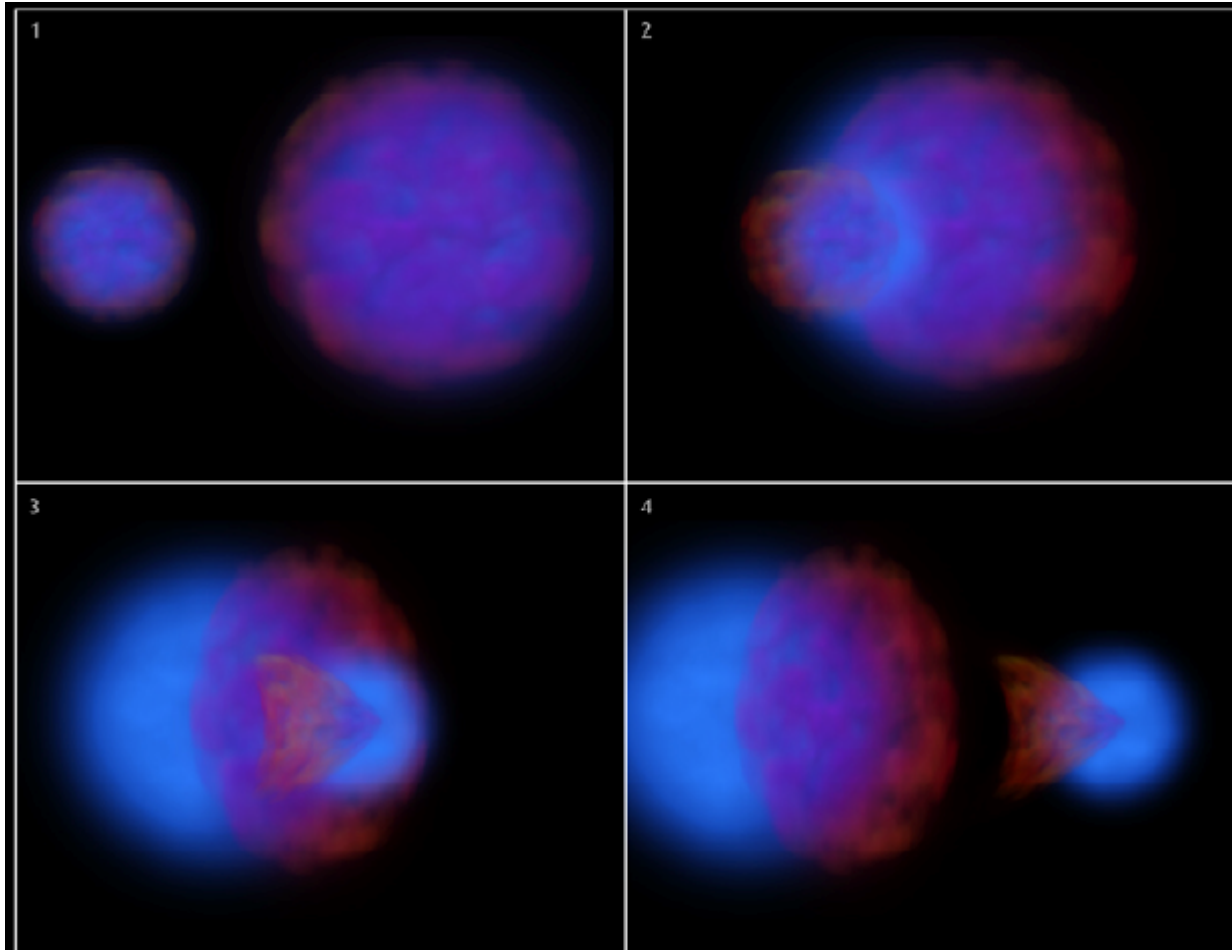


# Simulation CDM

La vitesse de la collision est obtenue

à partir de la forme du choc =  $4700_{\pm 500}$  km/s (Mach 3)

→ impossible de réconcilier avec CDM



CDM peut seulement

$V < 3500$  km/s

MOND  $> 4500$  km/s

Collision à 16%

sur-estimée?

$V_{\text{gas}}$  pourrait être

$> V_{\text{CDM}}$

# Abell 520

$z=0.201$



1' = 199 kpc

Rouge= gaz X

Contours= lentilles

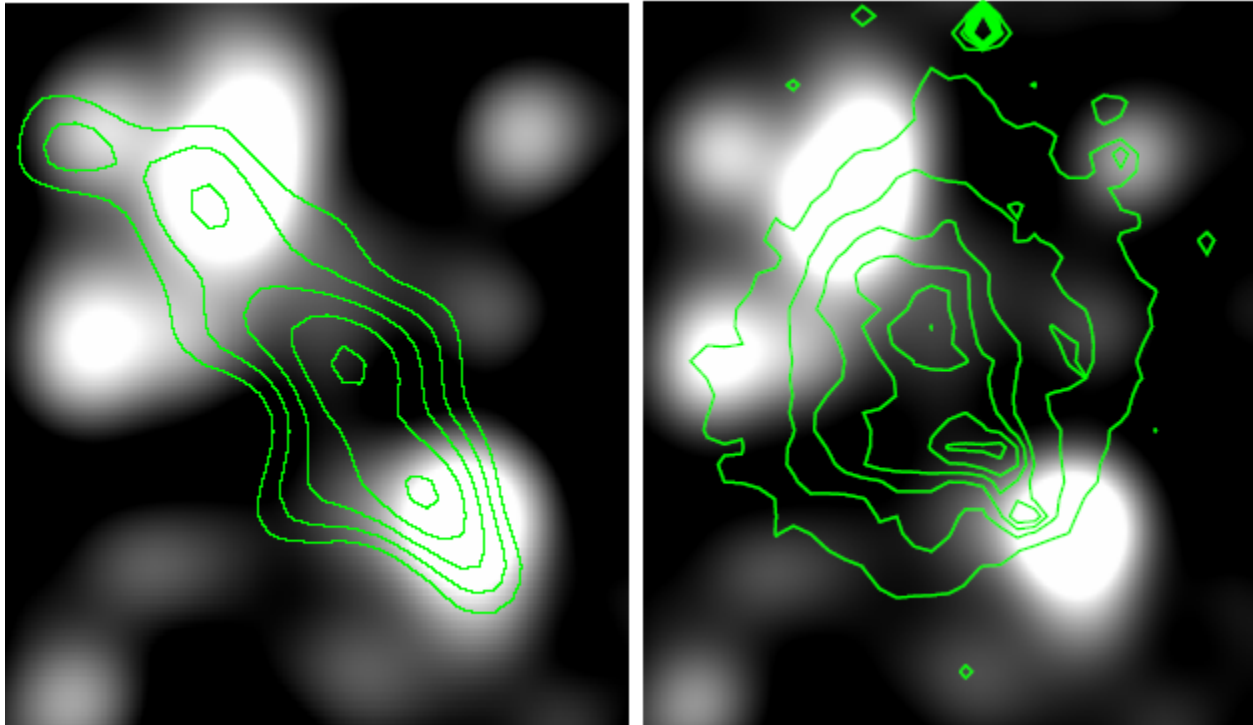
→ Matière noire

coincide avec le gaz X

Mais vide de galaxies

Cas opposé!

# Abell 520: amas en collision



Contours=masse totale

Contours = gaz X

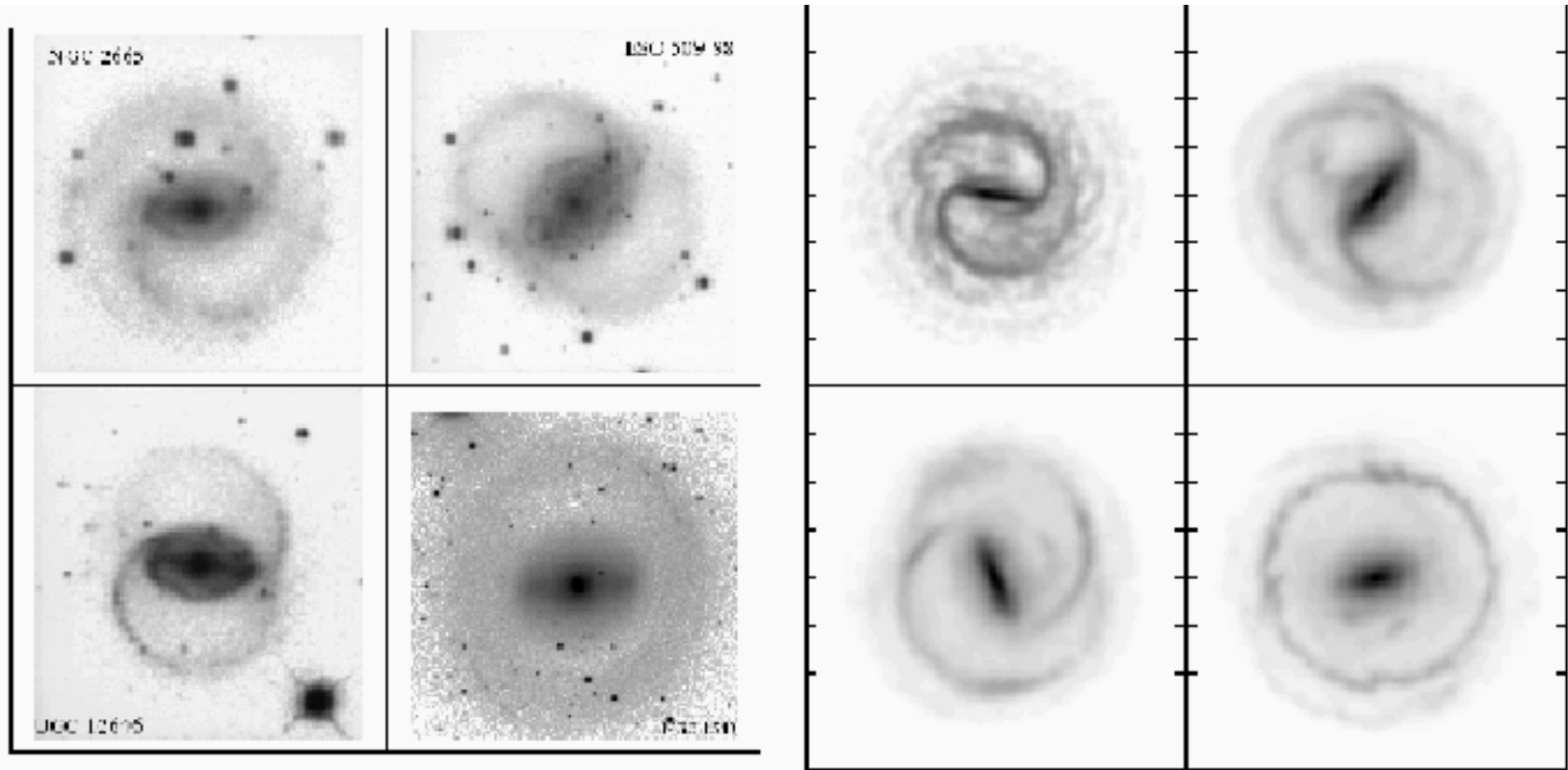
Comment les galaxies peuvent elles être éjectées  
du pic de matière noire??

# Dynamique des galaxies avec MOND

## Barres et anneaux

Observations

MOND





# Test crucial de MOND: interactions de galaxies, friction dynamique



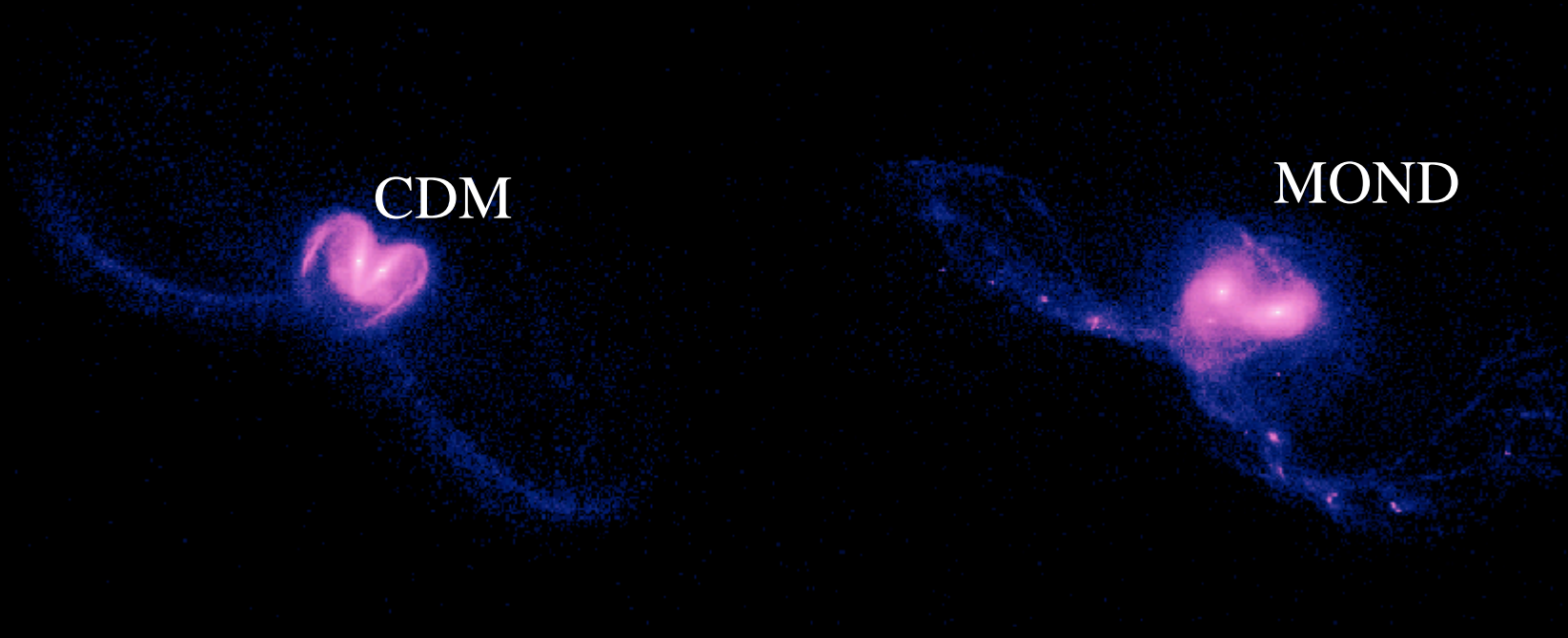
Les Antennes  
Prototype  
de fusion

0.00

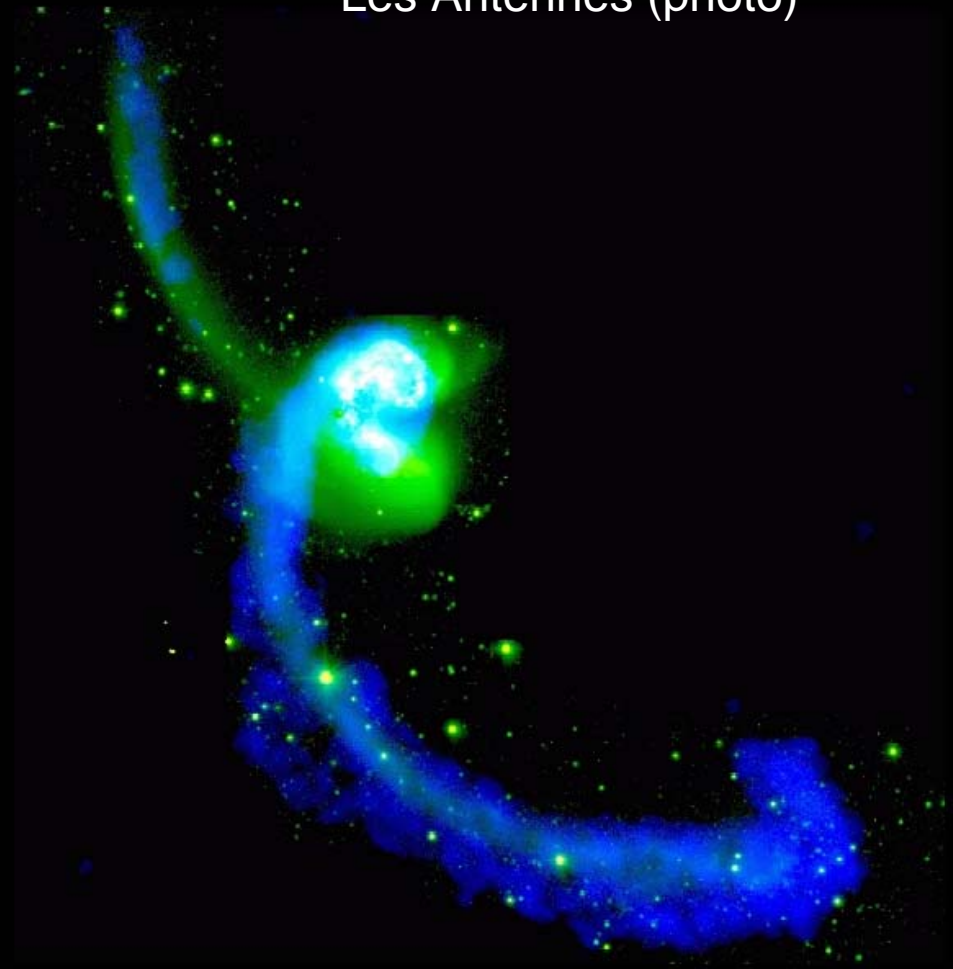


# Interactions de galaxies: les Antennes: MOND versus CDM

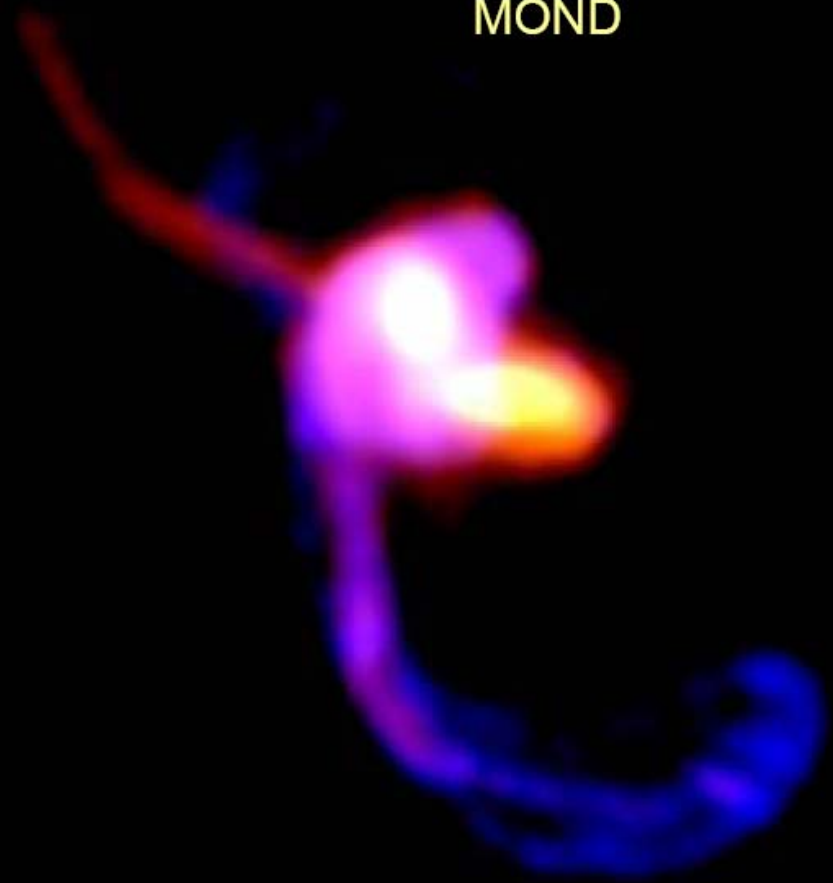
La friction dynamique est bien plus faible avec MOND:  
Les fusions durent plus longtemps

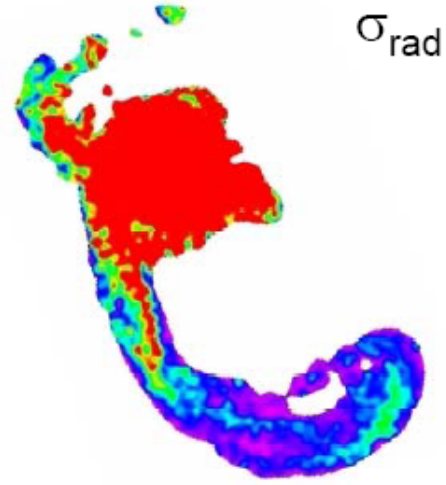
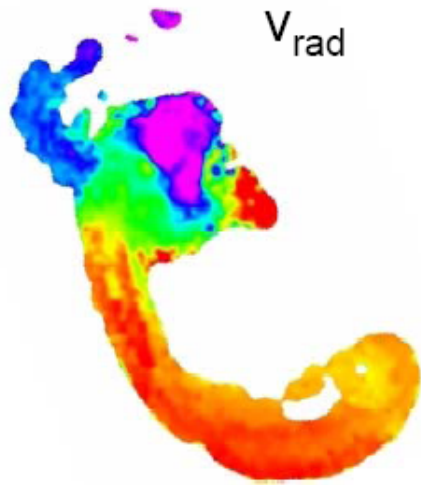


Les Antennes (photo)

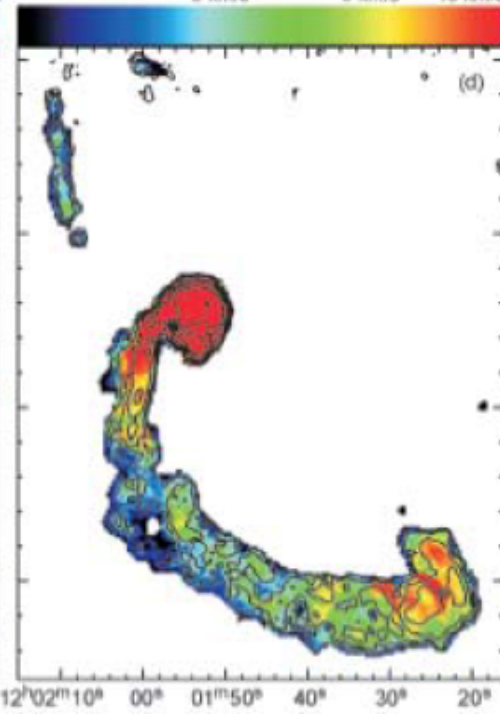
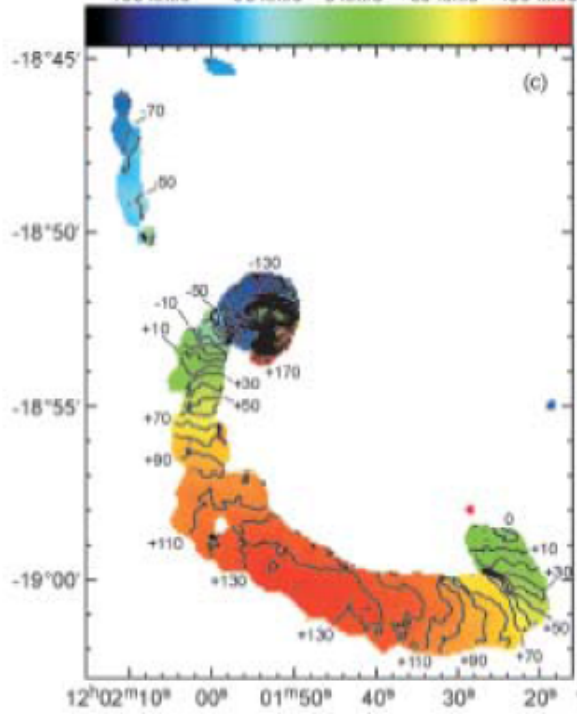
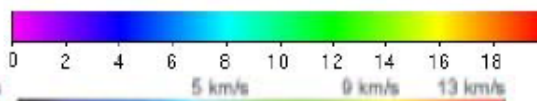
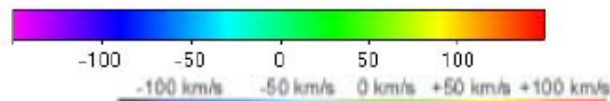


MOND

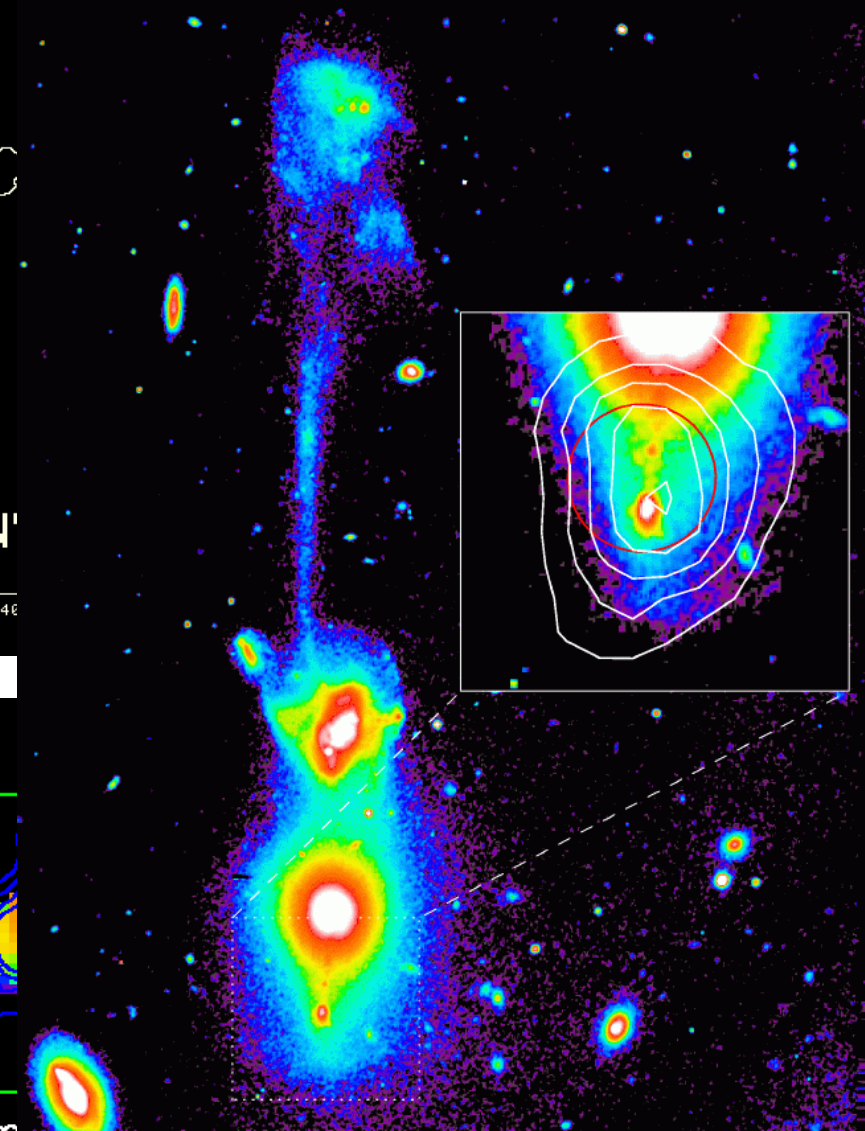
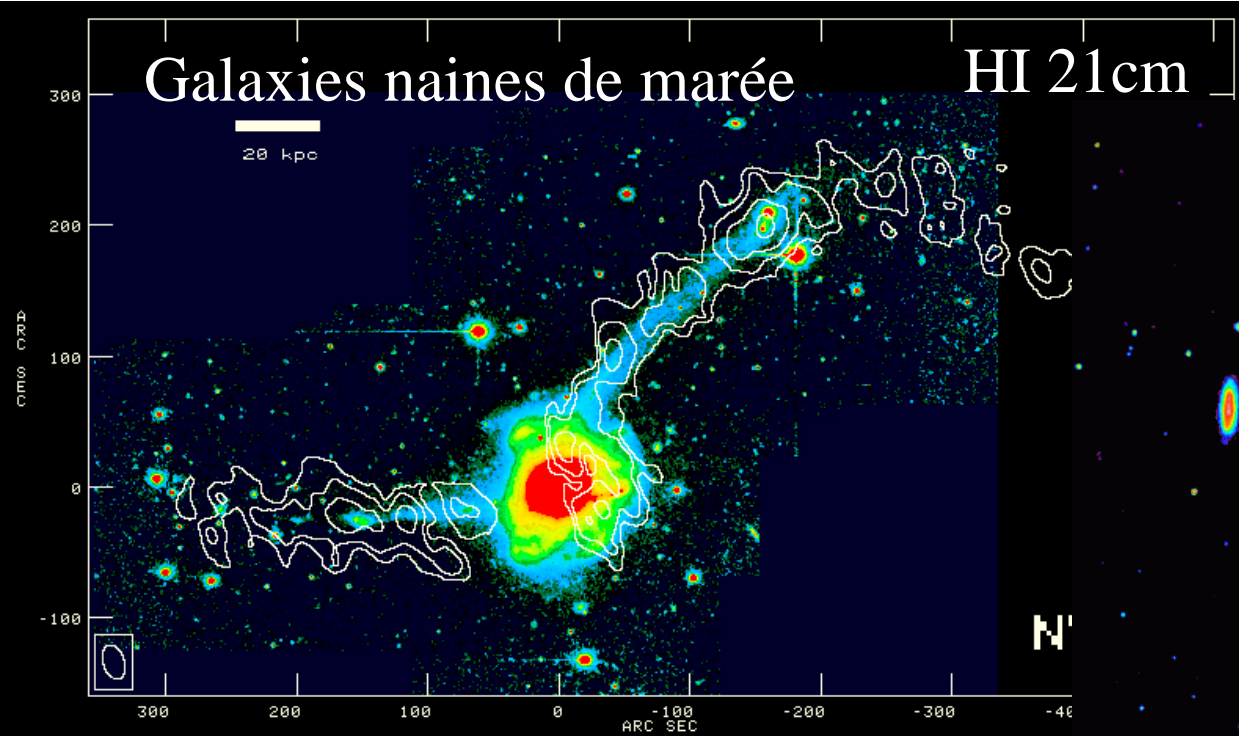




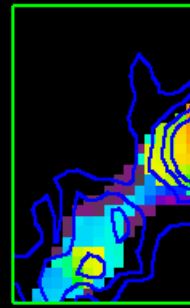
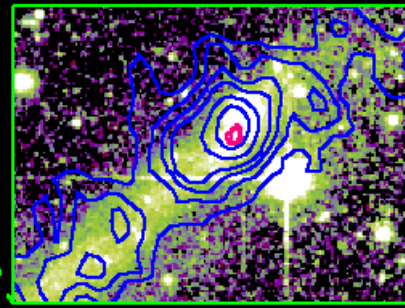
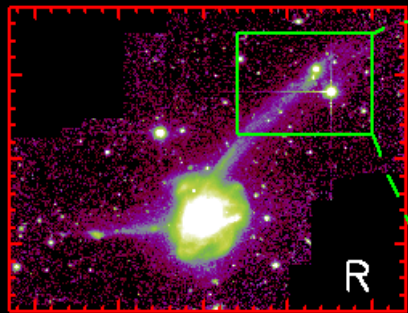
MOND



Observations



NGC 7252 Tidal Dwarf



R+Ha+HI mom0

HI mom0+mom1z

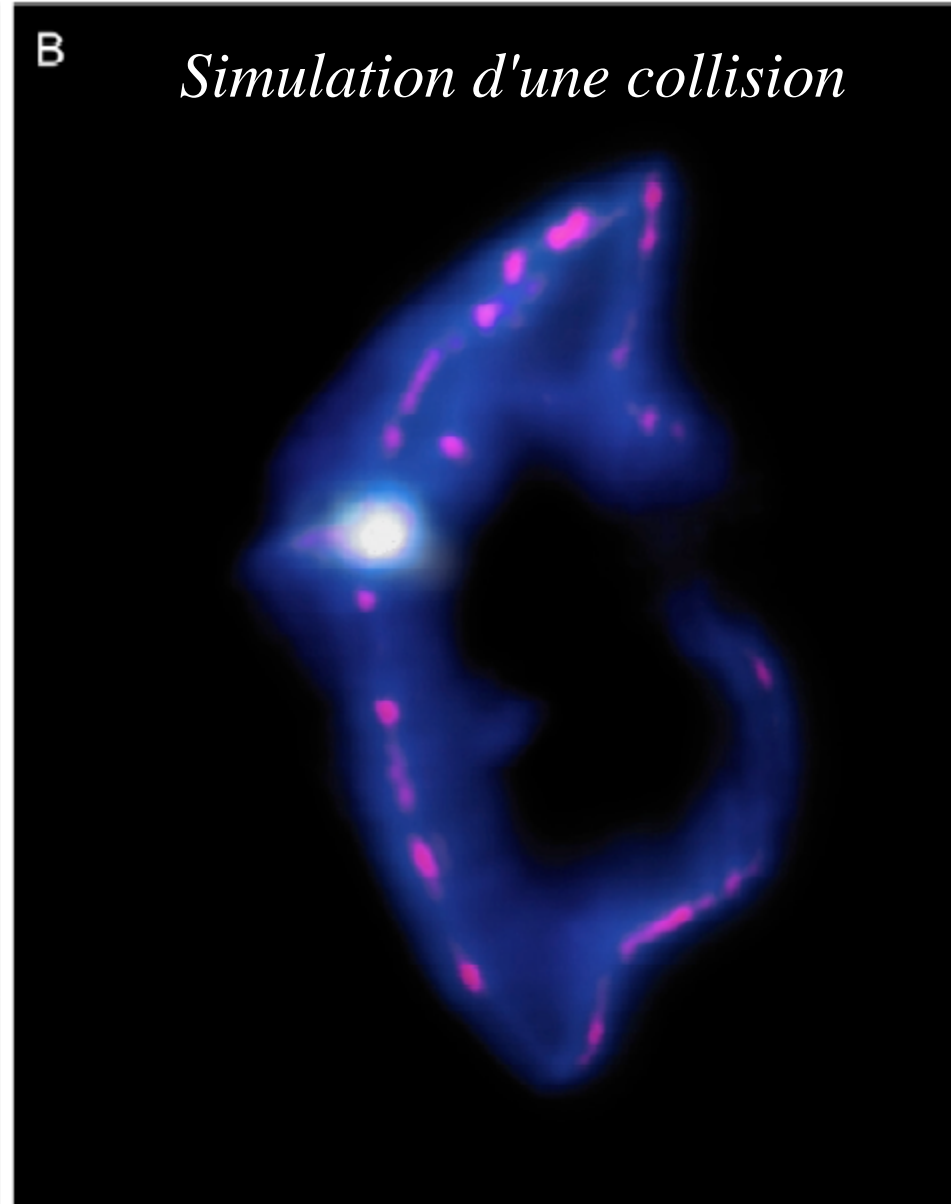
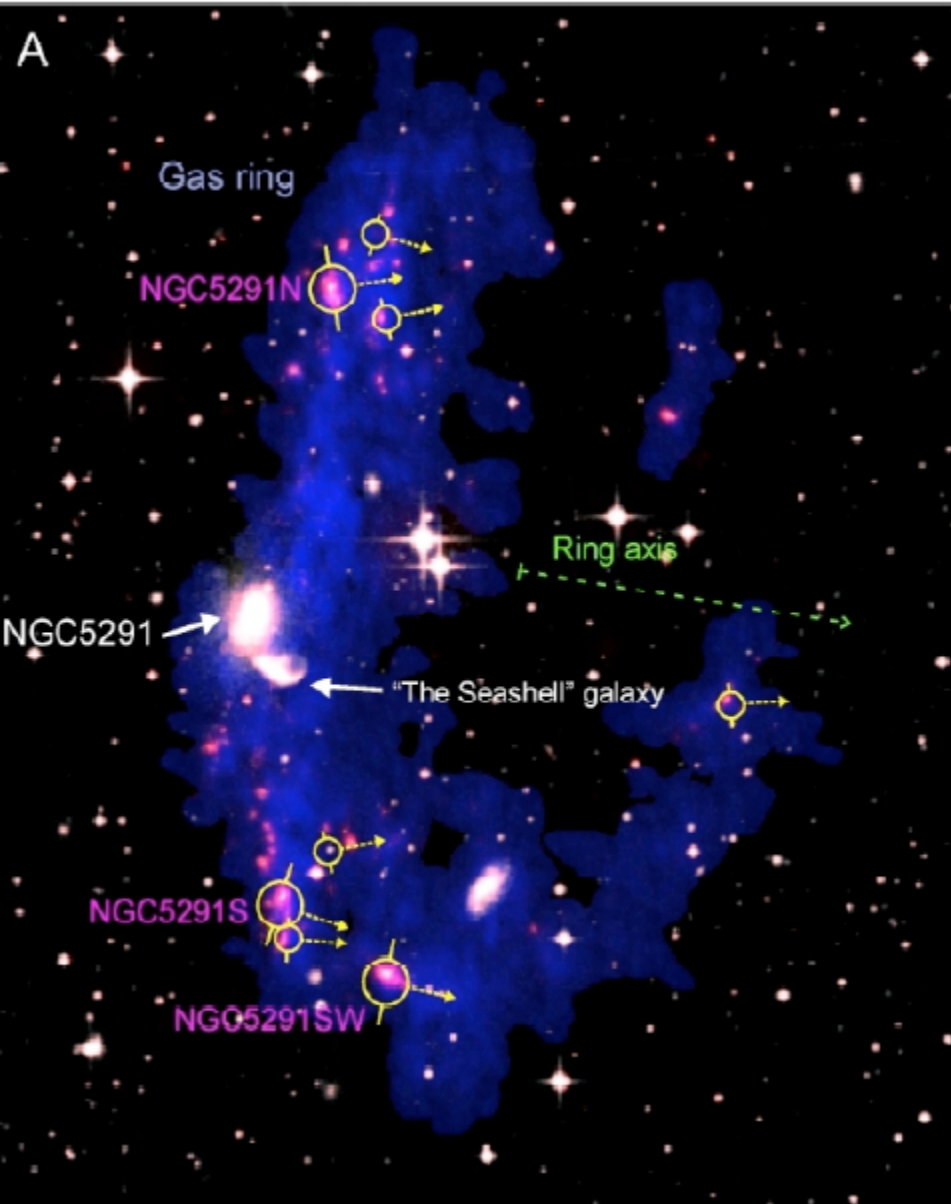
## Formation de naines de marées

# Formation des naines de marée

Disque plus auto-gravitant: → plus facile dans MOND  
de former ces petites galaxies

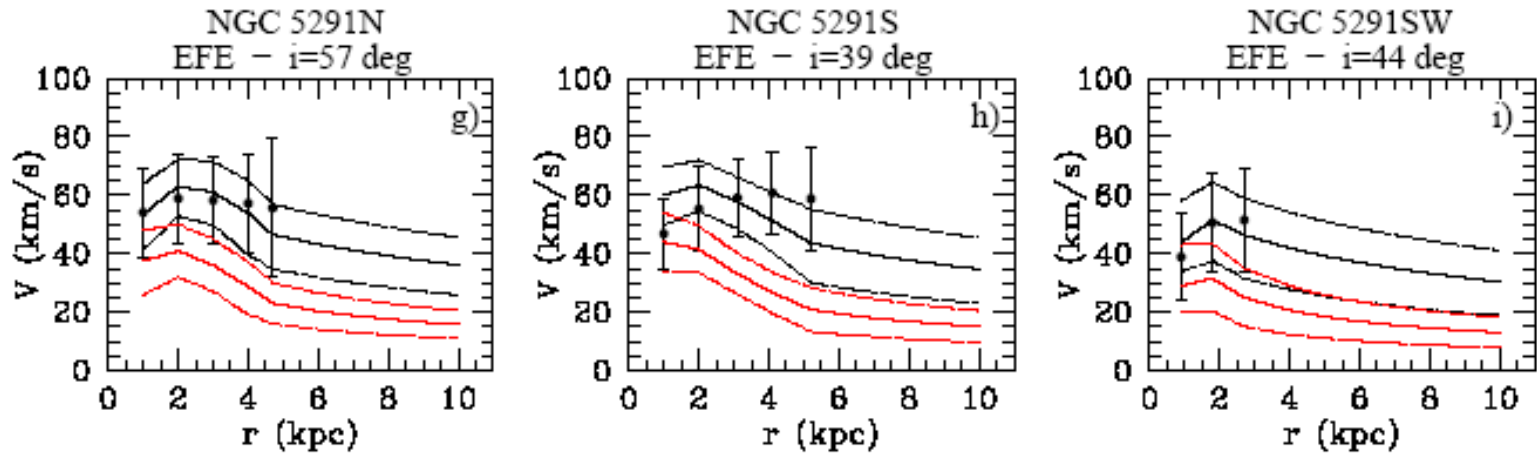


# Naines de marée dans N5291= anneau HI



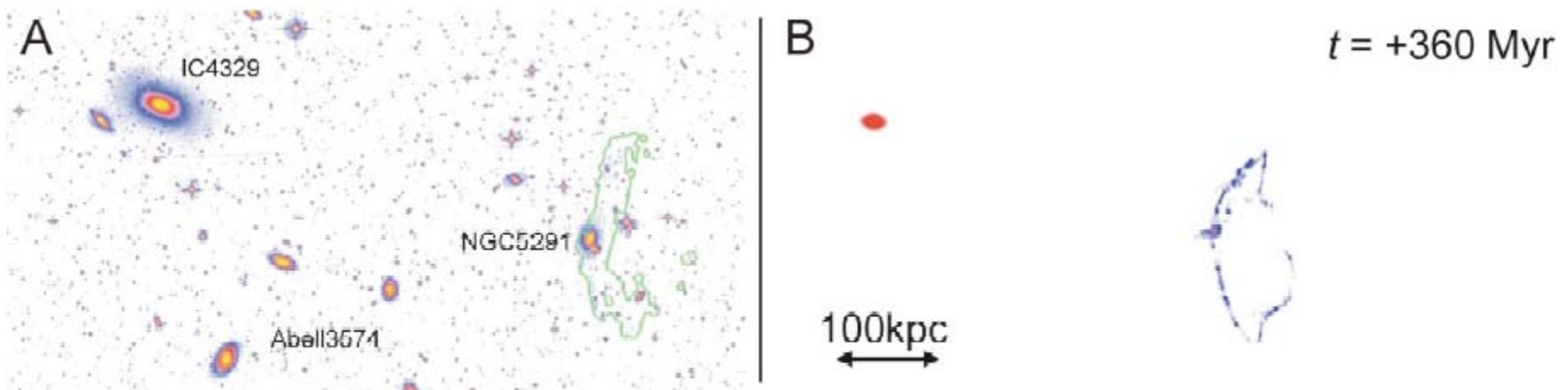


# Dynamique des naines de marée



Avec MOND

Ou alors, pas de CDM  $\rightarrow$  Baryons noirs, comme le gaz  $H_2$  ?



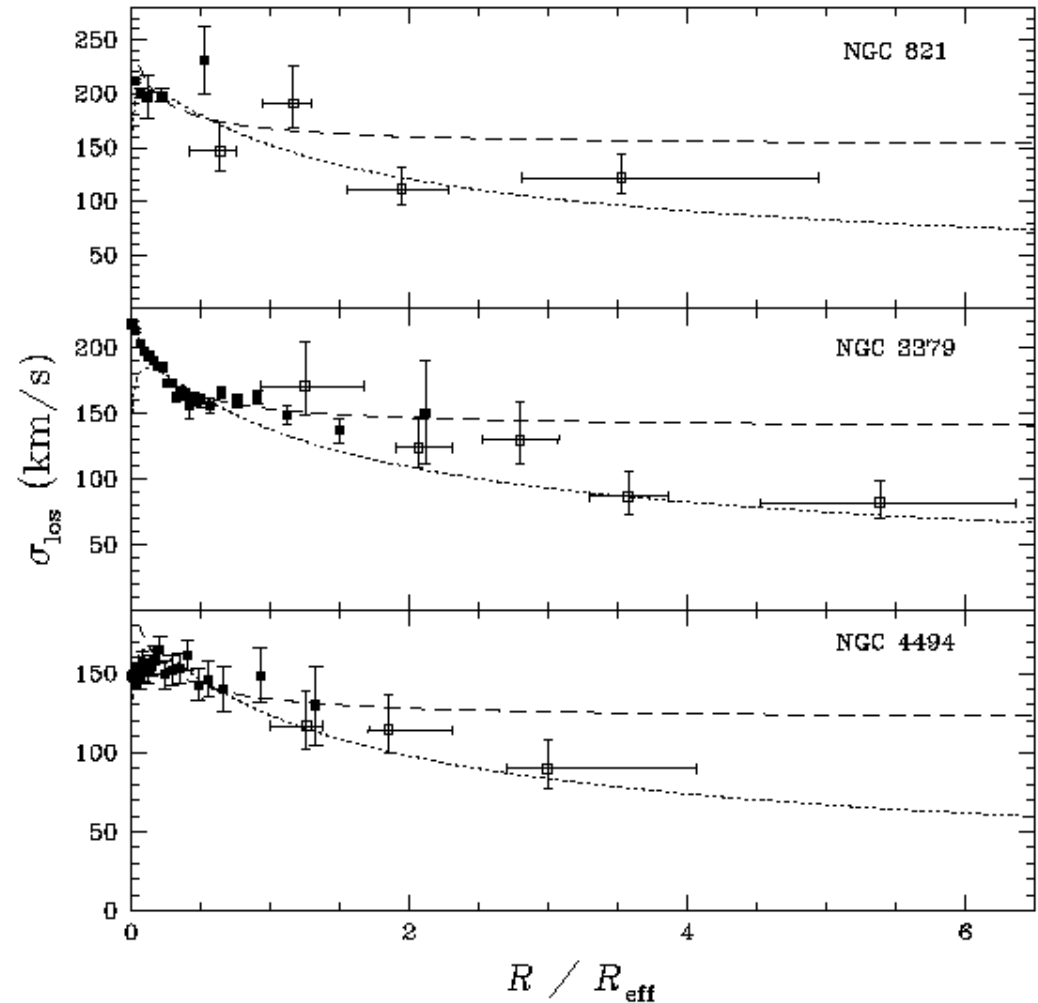
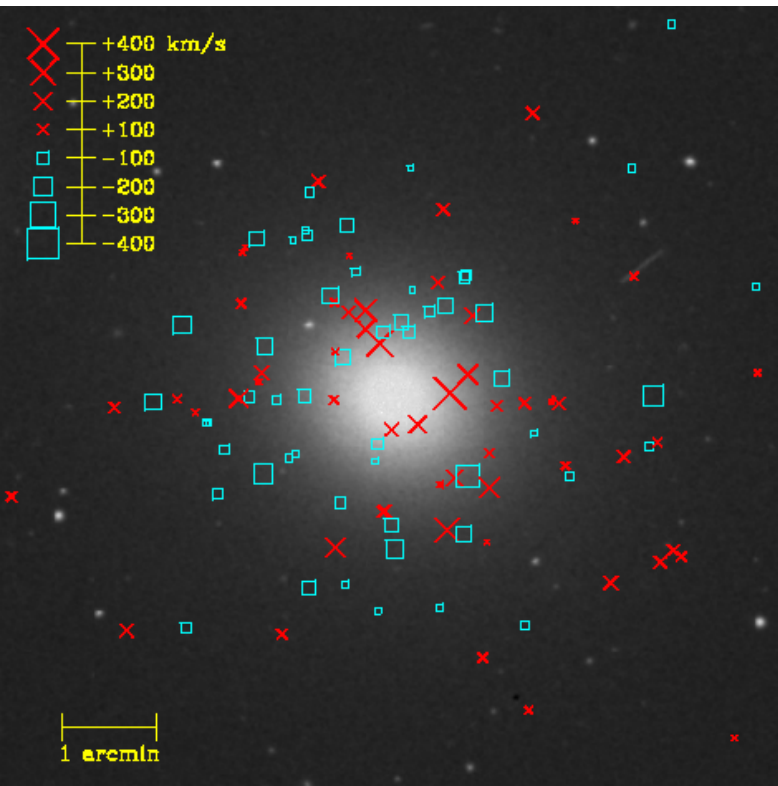
# Matière noire (MN) dans les Elliptiques

Nébuleuses planétaires

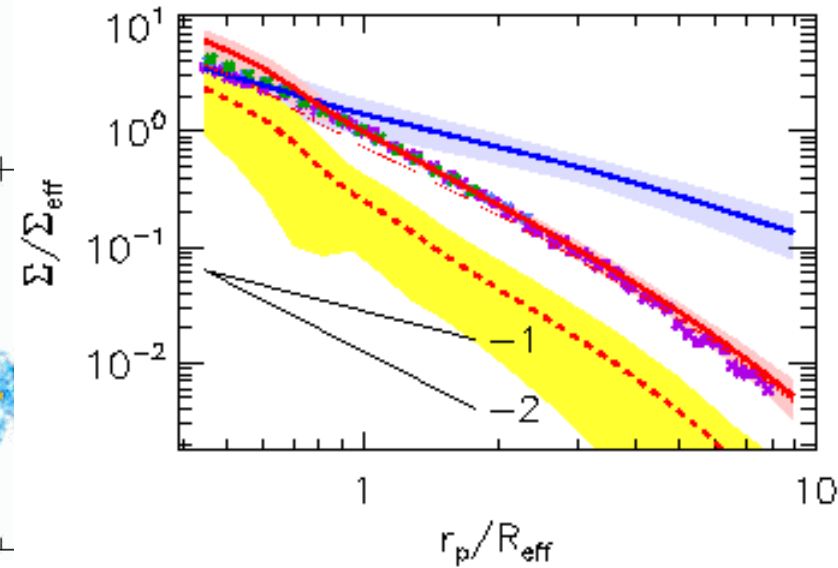
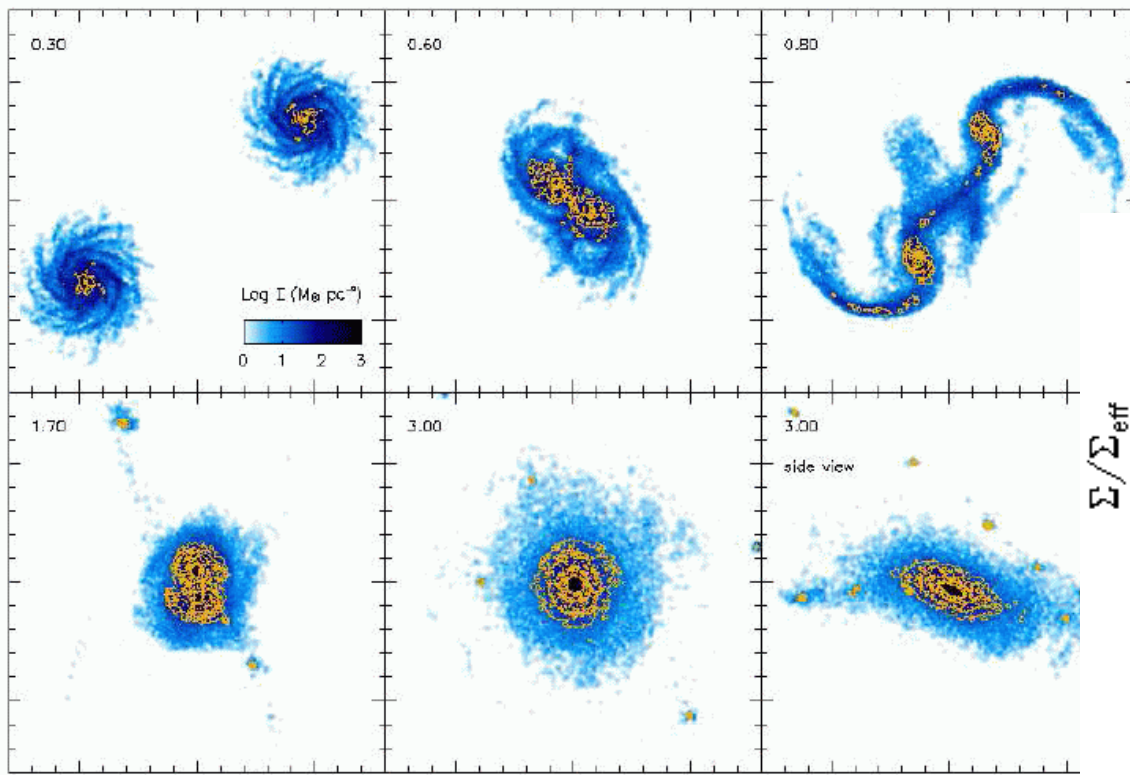
Manque de MN??

..... Matière visible (isotrope)

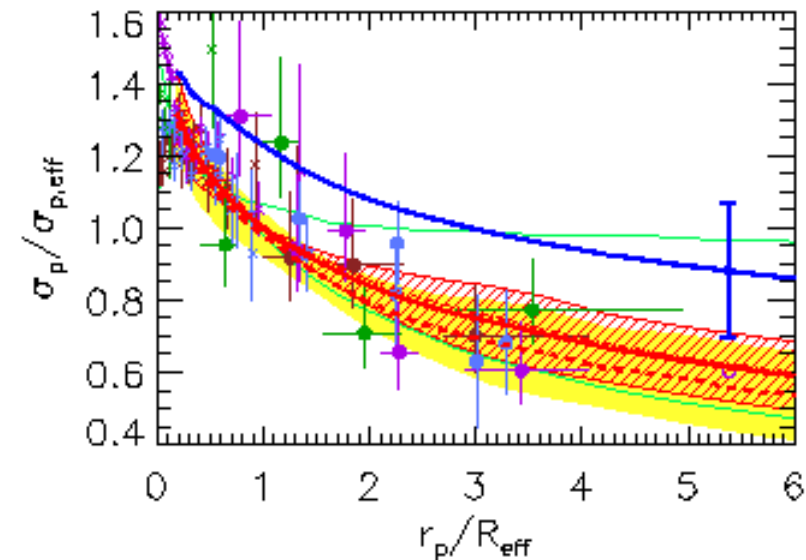
- - - isotherme (isotrope)



# Etoiles jeunes en jaune



Comparaison avec les données  
N821 (vert), N3379(violet)  
N4494 (brun), N4697 (bleu)

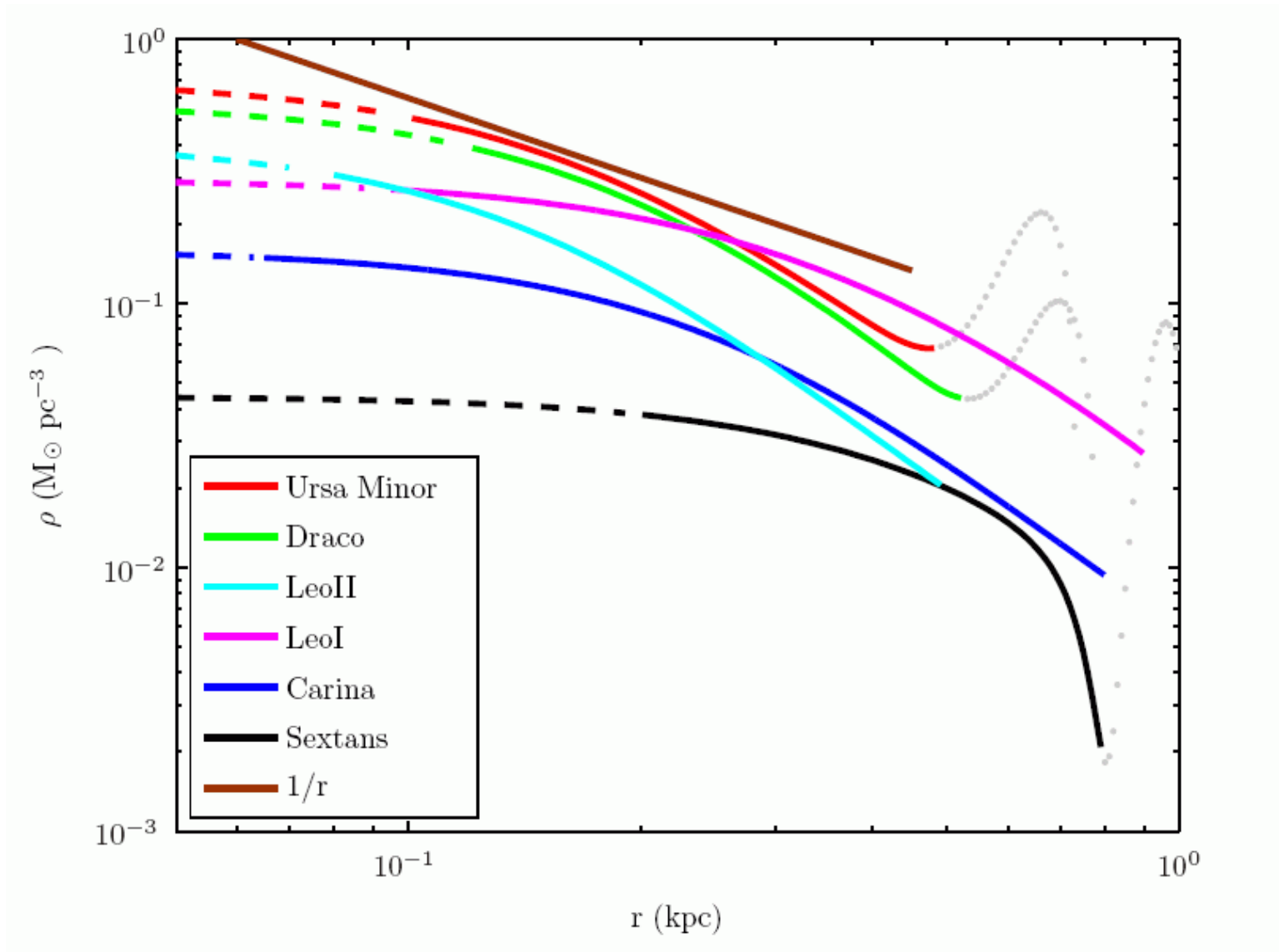


Draco  
Galaxie  
Naine

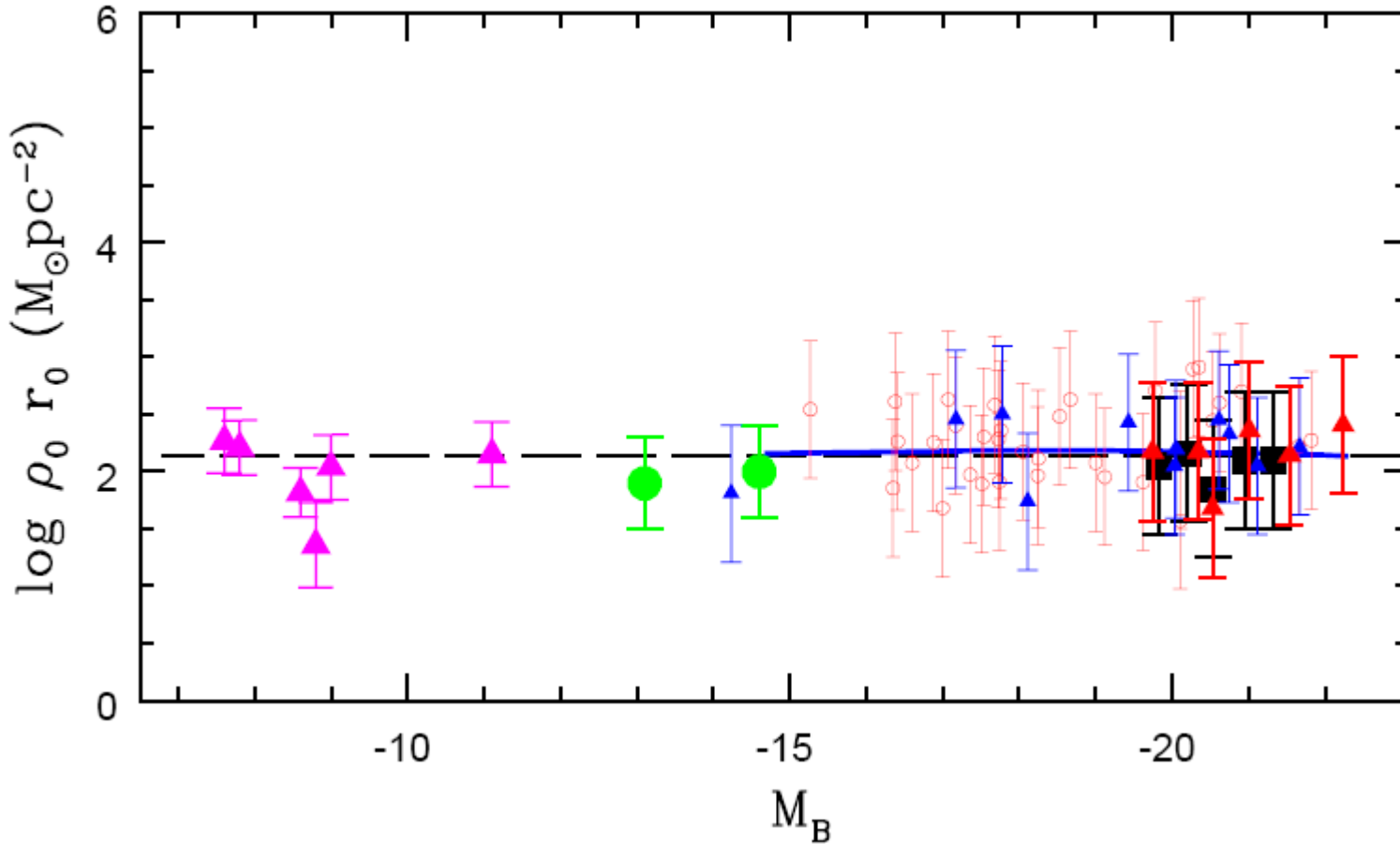
(image  
SDSS)



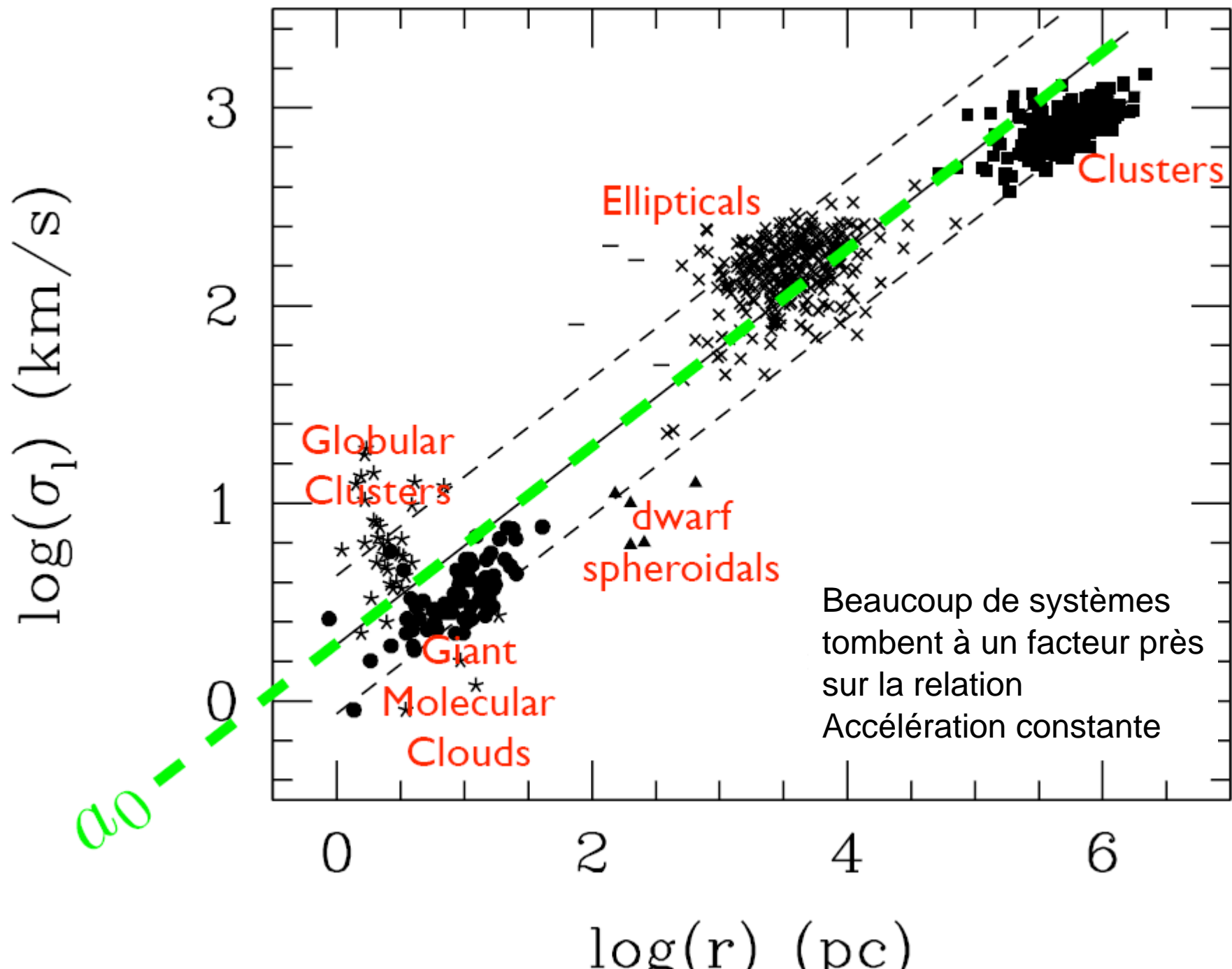
# Plateaux de densité, et non cuspides



# Densité de surface constante



1000 courbes de rotations, spirales, naines dSph, dlrr..



# Développements théoriques pour MOND

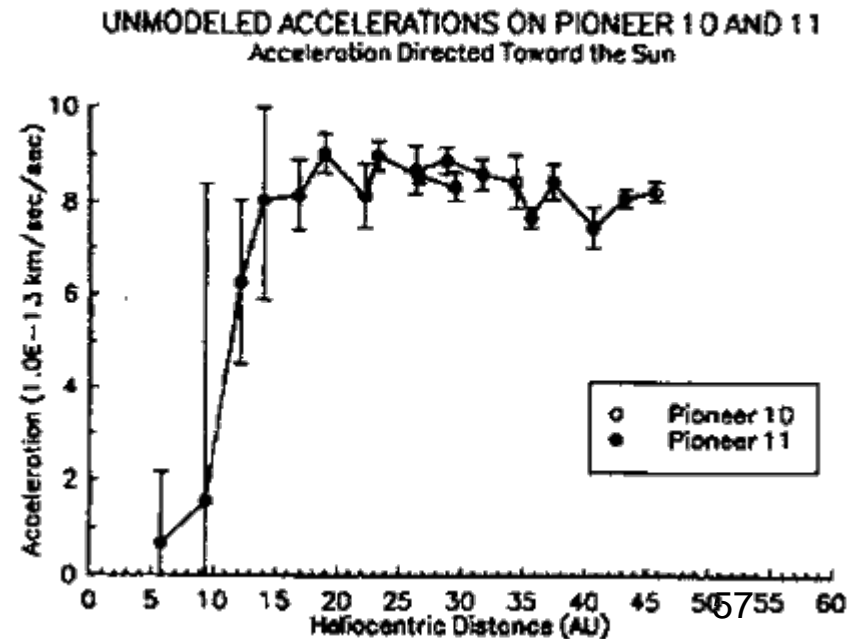
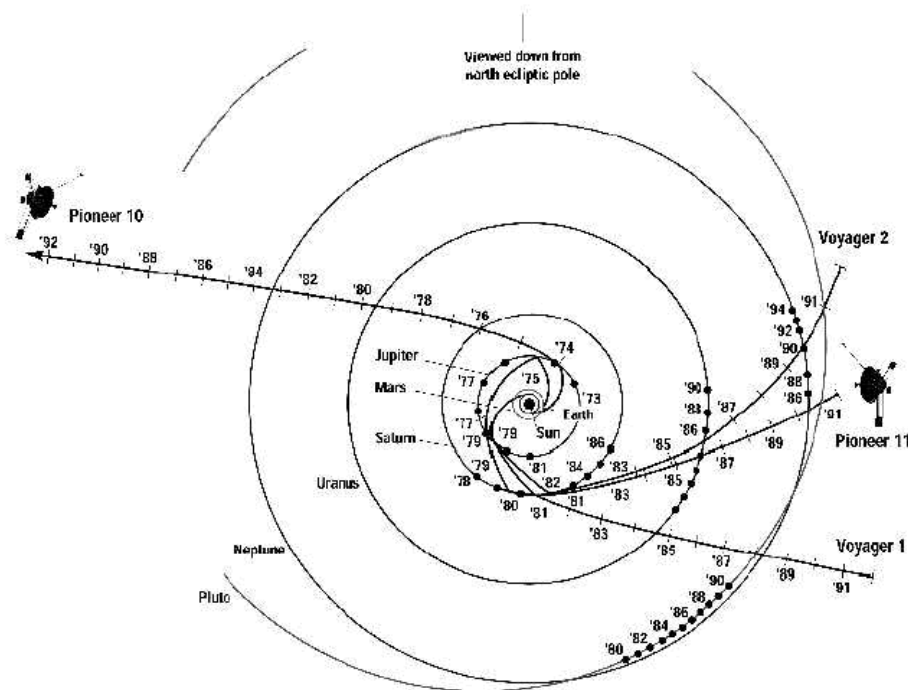
- **Théorie covariante de Lorentz TeVeS**, qui tend vers MOND à la limite (J. Bekenstein, 2004) → permet de considérer MOND ou CMB, pour les structures à grande échelle
- Théorie qui remplace GR, et tend vers Newton, ou MOND selon la valeur de l'accélération, permet d'expliquer les lentilles gravitationnelles



# Anomalie de Pioneer

Les sondes Pioneer 10 et 11, ont mesuré une accélération anormale après 10 AU dans le système solaire, du même ordre que  $a_0$

Autres explications?

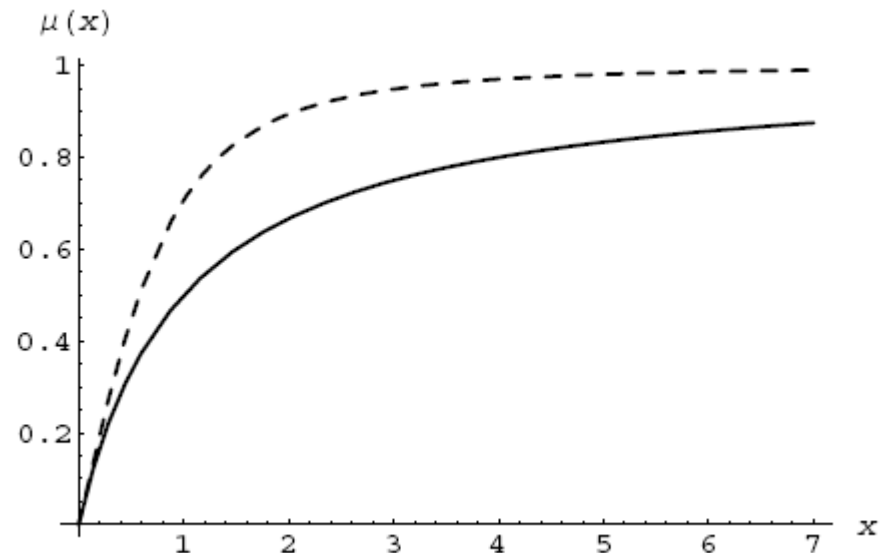


# Implications de MOND

- champ scalaire = 5<sup>ème</sup> force
  - Le champ permet aussi de rendre compte en une seule fois de l'énergie noire (  $\mu$ -essence, Zhao 06)
  - $a_0 \sim 1 \text{ Angström/s}^2$
- $\Lambda \sim a_0^2$

Matière et énergie noire sont deux facettes du changement de la gravité aux faibles courbures

$\mu = x/(1+x)$  trait plein  
 $\mu = x/(1+x^2)^{1/2}$  pointillé



# Matière noire + Energie noire

$$3 \ddot{R}/R = -4\pi G (\rho + 3 P) + \Lambda$$

L'expansion de l'univers s'accélère, Solutions:

- Univers dominé par un composant  $w = P/\rho < -1/3$  (quintessence)
- Constante cosmologique  $\Lambda$  positive
- Les équations de relativité Générale sont à changer...

Parmi les modèles TeVeS, il est possible de rendre compte de matière noire et énergie noire

*A suivre .....*